



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NESTACIONÁRNÍ CFD SIMULACE TOKU UZAVÍRAJÍCÍM
SE TABULOVÝM UZÁVĚREM**

UNSTEADY CFD SIMULATION OF FLOW UNDER A DOWNWARD MOVING GATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Málek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Klas, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Miroslav Málek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Roman Klas, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Nestacionární CFD simulace toku uzavírajícím se tabulovým uzávěrem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nouzové hrazení vodního toku do přivaděče vodní elektrárny představuje kombinovanou úlohu zahrnující řešení pohybových rovnic kapaliny a tuhého tělesa. Současně se jedná o problém dvoufázový, protože je nutné zajistit přívod vzduchu do přivaděče během uzavíracího procesu. Prostředky k zvládnutí tohoto problému představuje moderní výpočetní CFD software uvažující interakci kapaliny s tuhým tělesem. Vzhledem k obtížnosti simulace je vhodné uvažovat pouze o 2D simulaci. Zpracování diplomové práce zahrnuje také základní studium hradidel, pochopení a analýzu pohybových rovnic kapaliny a tuhého tělesa a využití tzv. dynamických výpočetních sítí.

Cíle diplomové práce:

Student v diplomové práci popíše hlavní části přehradové vodní elektrárny, provede rešerši základních typů hradidel a zmíní jejich funkci a použití. Následně zformuluje pohybové rovnice kapaliny a tuhého tělesa a stanoví velikost třecí síly působící na tabulový uzávěr. Rovněž popíše prostředí a možnosti zvoleného simulačního řešiče. V praktické části poté realizuje dvourozměrnou dvoufázovou CFD simulaci hrazení toku tabulovým uzávěrem do plného průtoku s jedním stupněm volnosti uzávěru. Hlavními dosaženými výsledky budou závislosti změny objemového průtoku na čase se stanovením doby uzavíracího procesu a základní rozbor sil působících na uzávěr. Simulace nemusí proběhnout až do úplného uzavření přivaděče.

Seznam doporučené literatury:

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. Mechanika kontinua. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2000. ISBN 80-200-0772-5.

ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-21-
-2037-5.

POCHYLÝ, František. Dynamika tekutinových systémů. Praha: Československá redakce VN MON,
1990. ISBN 80-214-0139-7.

NECHLEBA, Miroslav. Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. 2. rozšířené vydání. Praha:
SNTL, 1962.

GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. Malé vodní elektrárny. Praha: Vydavatelství
ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1812-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Nouzové uzávěry jsou důležitým bezpečnostním prvkem vodních elektráren. Slouží k zahrazení toku při havarijních stavech, a tím k ochraně prvků a zařízení nacházejících se za uzávěrem. V práci jsou provedeny simulace hrazení toku tabulovým uzávěrem na dvourozměrném modelu vodní elektrárny Slapy. Simulace jsou provedeny pro případ hrazení konstantní rychlostí zavírání a hrazení pádem uzávěru do toku. Jedná se o simulace s tzv. dynamickou sítí, kdy dochází k přesíťování výpočetní domény během simulace. K pohybu pádu uzávěru je využita metoda 6DOF a pohyb je řízen uživatelskou funkcí, která zahrnuje vliv tíhy uzávěru, působících sil vyvolaných proudícími tekutinami a vliv třecí síly. V simulacích je ověřeno silové působení tekutin a závislost objemového průtoku na době hrazení a na relativním uzavření. V případě simulace pádu uzávěru je také sledována rychlost a orientace pohybu uzávěru a je stanovena doba uzavíracího procesu.

KLÍČOVÁ SLOVA

CFD, nouzové hrazení toku, dynamická síť, metoda 6DOF, vodní elektrárna Slapy

ABSTRACT

Emergency gates are important safety feature of hydropower plants. They are used to close the flow in order to protect power plant equipment in case of emergency. In this diploma thesis are realized CFD simulations of emergency closure of wheel-mounted gate on two-dimensional model of the Slapy hydropower plant. Simulations were performed for the case of constant lowering gate speed and for the case of gravitational closure. Dynamic mesh was used to enable the gate motion. The 6DOF method was used for the case of gravitational closure and user defined function was defined to control movement of the gate. User defined function include gravitational force, hydrodynamic forces and friction force. Simulations were used to verify forces acting on gate and volume flow through gate during closing process. In case of gravitational closure the speed and orientation of closing process and closing process time were determined.

KEY WORDS

CFD, emergency gate closure, dynamic mesh, 6DOF method, Slapy hydropower plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁLEK, Miroslav. *Nestacionární CFD simulace toku uzavírajícím se tabulovým uzávěrem*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132830>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Roman Klas.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Nestacionární CFD simulace toku uzavírajícím se tabulovým uzávěrem* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu literatury, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Bc. Miroslav Málek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Romanu Klasovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích při vedení této diplomové práce. Velké díky také patří моým rodičům, kteří mě v průběhu studia nesmírně podporovali.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 HLAVNÍ ČÁSTI PŘEHRADOVÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	12
1.1 Vzduovací zařízení.....	12
1.2 Odběrné zařízení	14
1.3 Přivaděč, vyrovnávací komora, tlakové potrubí	14
1.4 Strojovna	14
1.5 Odpad.....	15
2 ROZDĚLENÍ ZÁKLADNÍCH TYPŮ HRADIDEL.....	16
2.1 Jezová klapka	16
2.2 Bubnové hradidlo	17
2.3 Segmentový uzávěr	17
2.4 Přepážková hradidla	18
2.5 Plovoucí přepážková hradidla	19
2.6 Nafukovací hradidlo.....	20
2.7 Posuvné hradidlo.....	20
2.8 Kapotované hradidlo	21
2.9 Tabulové hradidlo	22
3 TEORIE MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ.....	24
3.1 Zákon zachování hmotnosti	24
3.2 Zákon zachování hybnosti	24
3.3 Zákon zachování energie	25
3.4 Určení charakteru proudění.....	25
3.5 Modely turbulence	26
3.5.1 Metoda přímé numerické simulace DNS.....	26
3.5.2 Metoda velkých vírů LES.....	26
3.5.3 Metoda časového středování RANS.....	26
4 SIMULACE HRAZENÍ TOKU VE SLAPY	28
4.1 Geometrie modelu.....	28
4.1.1 Popis 3D modelu	28
4.1.2 Popis 2D modelu	30
4.2 Rozbor sil působících na tabulový uzávěr	31
4.3 Výpočetní síť.....	33
4.4 Nastavení výpočtu a okrajových podmínek	37
4.4.1 Fyzikální vlastnosti pracovních médií	37
4.4.2 Okrajové podmínky	37
4.4.3 Metoda 6DOF a uživatelská funkce UDF	39
4.4.4 Nastavení řešiče	40
5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULACÍ HRAZENÍ TOKU	41
5.1 Výsledky simulace hrazení toku konstantní rychlostí 0,2 m/s.....	41
5.1.1 Popis simulace hrazení toku	41
5.1.2 Průběh objemového průtoku.....	41
5.1.3 Průběh horizontální síly.....	42
5.1.4 Průběh vertikální síly.....	42
5.1.5 Průběh výslednice sil v ose zavírání.....	43

5.2	Výsledky simulace hrazení toku pádem tabulového uzávěru	44
5.2.1	Popis simulace pádu uzávěru.....	44
5.2.2	Průběh rychlosti pádu uzávěru	44
5.2.3	Průběh objemového průtoku při pádu uzávěru.....	45
5.2.4	Průběh horizontální síly při pádu uzávěru	46
5.2.5	Průběh vertikální síly při pádu uzávěru.....	47
5.2.6	Průběh výslednice sil v ose zavírání při pádu uzávěru	48
ZÁVĚR		50
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		55
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....		56
SEZNAM PŘÍLOH.....		57
A	VÝPOČETNÍ SÍŤ.....	58
B	UDF PÁDU UZÁVĚRU	61
C	PODROBNÉ NASTAVENÍ ŘEŠIČE.....	62
D	HRAZENÍ TOKU KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ.....	64
E	HRAZENÍ TOKU PÁDEM UZÁVĚRU	72

ÚVOD

Nouzové uzávěry jsou důležitým bezpečnostním prvkem vodních elektráren. Slouží k ochraně prvků a zařízení, které se nacházejí za těmito uzávěry. Z tohoto důvodu jsou často umísťovány v blízkosti vtoku hráze. Nouzové uzávěry jsou provozovány zejména při havarijních stavech. Uzávěry jsou navrženy pro gravitační uzavření nebo zavření pomocí ovládacího zařízení. Vodní elektrárna Slapy, na jejímž přibližném modelu budou provedeny simulace hrazení toku, je vybavena tabulovým uzávěrem ovládaným hydraulickým válcem.

V praktické části budou provedeny CFD simulace hrazení toku tabulovým uzávěrem do plného průtoku na modelu vodní elektrárny Slapy. Pro zjištění silového působení na uzávěr a jevů v průběhu hrazení budou provedeny dvě simulace. První simulací hrazení toku bude uskutečněna simulace zavírání uzávěru konstantní rychlostí 0,2 m/s. Tato rychlost odpovídá přibližné rychlosti zavírání uzávěru na VE Slapy a tím zajišťuje i obdobnou dobu zahrazení toku. Druhá simulace, která bude provedena, bude simulace pádu uzávěru do toku vlivem gravitace a působících sil vyvolaných proudící kapalinou. V obou simulacích bude uvažován vliv třecí síly.

Z hlediska simulace se bude jednat o výpočet s tzv. dynamickou sítí, kdy dochází k přesíťování výpočetní domény v průběhu simulace vlivem pohybu uzávěru. Protože je přivaděč na vodní elektrárně Slapy vybaven zavzdušňovacím potrubím, bude nutné v simulaci uvažovat proudění jako dvoufázové. Participujícími fázemi budou voda a vzduch. V průběhu hrazení toku bude docházet k přísávání vzduchu v zavzdušňovacím potrubí a k zavzdušnění přivaděče a oblasti za tabulovým uzávěrem.

Z důvodu náročnosti výpočtu budou simulace provedeny na dvourozměrném modelu a pohyb uzávěru bude omezen pouze na translační ve směru zavírání či otevírání uzávěru. V simulacích tak nebude zachycen pohyb tabulového uzávěru ve vymezených vůlích vedení kol uzávěru a jeho mírné natáčení, při kterém může dojít k nerovnoměrnému zatížení vodících kol a těsnění, a tím i ovlivnění velikosti třecích sil.

Sledovanými výsledky simulací budou závislosti objemového průtoku, průběhy horizontální a vertikální síly od proudících tekutin a výsledná síla působící na tabulový uzávěr v ose zavírání. Sledované veličiny budou zpracovány v závislosti na době hrazení a na relativním uzavření. V případě simulace hrazení toku pádem uzávěru bude navíc stanovena doba uzavíracího procesu a průběh rychlosti pádu uzávěru. V simulaci hrazení pádem uzávěru bude také sledováno, zda nedochází k zastavení nebo ke změně orientace pohybu uzávěru vlivem působících sil, a tím k jeho otevírání.

Tato práce vznikla za podpory projektu "Výpočtové simulace pro efektivní nízkoemisní energetiku" reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008392 financovaného z OP VVV, Prioritní osy 1: Posilování kapacit pro kvalitní výzkum.

1 HLAVNÍ ČÁSTI PŘEHRADOVÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

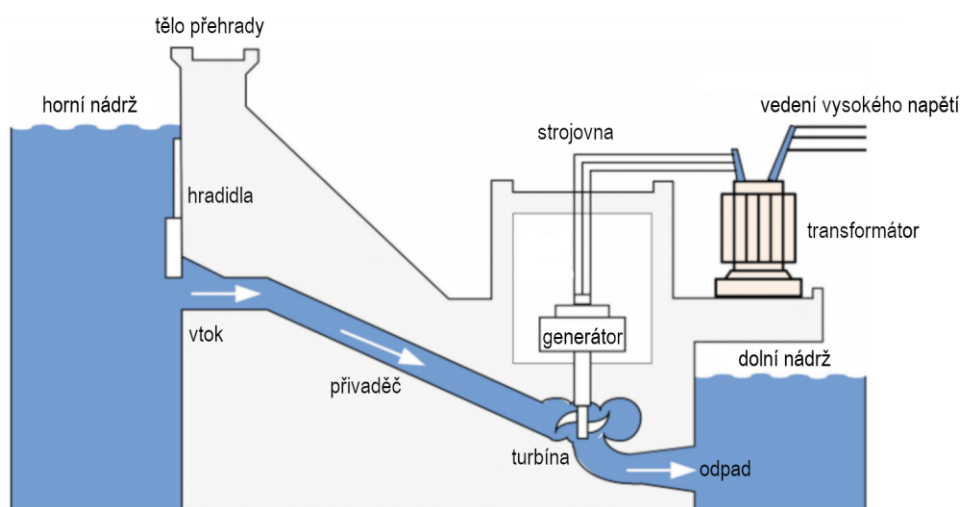
V této části diplomové práce jsou popsány přehradové vodní elektrárny, jejich funkce a hlavní části, ze kterých se skládají.

Vodní elektrárny jsou obnovitelným zdrojem energie využívajícím přeměny potenciální a kinetické energie vody na energii elektrickou. Elektrárny mohou dosahovat výkonu v řádech desítek kilowattů u nejmenších průtočných až po desítky gigawattů u největších přehradových elektráren. Dle využití vodního toku je lze rozlišit na průtočné jezové a deviační, akumulární neboli přehradové, přečerpávací a slapové vodní elektrárny. Následující část diplomové práce je věnována problematice přehradovým vodním elektrárnám.

Přehrady vodních elektráren kromě zadržování vody pro získání potřebného spádu k energetickému využití slouží mimo jiné i k hromadění vody pro hospodářské účely, například zásoby pitné vody, k zadržování povodňových vln, či k rekreačním účelům. [1]

Typická přehradová vodní elektrárna obsahuje následující části:

- vzdouvací zařízení
- odběrné zařízení
- přivaděč, vyrovnávací komora, tlakové potrubí
- strojovna
- odpad



Obr. 1: Schéma přehradové vodní elektrárny (upraveno) [2]

1.1 Vzdouvací zařízení

Vzdouvací zařízení je tvořeno tělem přehrady, která slouží jako bariéra k akumulaci vody v horní nádrži a zajišťuje vytvoření potřebného spádu k energetickému využití. Mimo jiné vzdouvací zařízení zastává funkci protipovodňové ochrany.

Existuje mnoho tvarů a typů konstrukcí přehrad. Dle přenosu hydrostatického zatížení stavby přehrady rozlišujeme tížné (gravitační), klenbové a členěné přehrady. Tížné přehrady přenášejí hydrostatické zatížení do podloží stavby, klenbové přenášejí významnou část zatížení do

boků údolí a přehrady členěné přenášejí zatížení na soustavu pilířů, jejichž tížným účinkem se zatížení přenáší do podloží. Konstrukce přehrad často využívají kombinace těchto typů přenosu zatížení, jako například u klenbových přehrad s tížným účinkem, nebo u členěných přehrad klenbovou hradicí stěnou.

Tělo přehrad obsahuje vtokový objekt s přiváděcím potrubím vody do elektrárny a bezpečnostní přelivy.

Bezpečnostní přelivy umožňují bezpečný odtok nadbytečné vody v horní nádrži a zamezují nekontrolované přelítí hráze. Přelivy mohou být hrazené či nehrazené. Hrazené přelivy jsou vybaveny hradicím zařízením, jenž umožňuje regulaci odtoku. Jejich výhodou je to, že téměř celá výška přehrady může být po celý rok zaplněna vodou a v případě povodní či vyšších vod otevřeno jedno nebo více hradidel pro odtok nadbytečné vody. Na rozdíl nehrazené přelivy nejsou vybaveny hradicím zařízením a tím pádem neumožňují regulaci odtoku. Přebytná voda začne odtékat vždy v případě, když výška horní hladiny překročí korunu přelivu.

Mezi hlavní typy bezpečnostních přelivů přehradových vodních elektráren patří:

- *Korunový přeliv*¹
- *Stupňovitý přeliv*²
- *Kašnový přeliv*³
- *Sifonový přeliv*⁴

Korunové přelivy mohou být hrazené či nehrazené, umožňují odtok přebytečné vody přes korunu hráze. Dno a boční stěny přelivu jsou nejčastěji stavěny z betonu a jeho příčný řez často připomíná S-křivku. U těchto přelivů nedochází k tak dobré disipaci energie vody jako u stupňovitých přelivů, proto pro zlepšení disipace mohou být vybaveny betonovými přepážkami. Ochranu paty přehrady před nadměrnou erozí zajišťuje hydraulický skok, v němž dochází k maření energie odtékající vody.

Stupňovité přelivy, stejně jako korunové, mohou být hrazené či nehrazené. Jsou tvořeny jednotlivými schody, nebo stupni, v nich dochází k výrazné disipaci energie vody. Z tohoto důvodu stupňovité přelivy vyžadují menší velikosti disipačních nádrží u paty přelivu.

Kašnové přelivy jsou typicky nehrazené a neumožňují regulaci odtoku. Vstupní těleso přelivu se nachází v nádrži a tvarem připomíná obrácený zvon. Přebytná voda vtéká do přelivu po celém obvodu hrany přelivu.

Sifonový přeliv funguje na principu rozdílu tlaku mezi vstupem a výstupem z přelivu. V případě, že výška hladiny v horní nádrži překročí povolenou mez, dochází k zaplnění sifonu a nasávání vody sifonem do spodní nádrže. Pro zajištění správného chodu přelivu, je sifon vybavený odvzdušňovacím zařízením, nebo je navržený tak, aby k jeho odvzdušnění došlo samotným prouděním vody.

Dalšími bezpečnostními přelivy jsou boční, šachtový, propustkový, či jiné méně časté konstrukce přelivů. [3] [4]

¹ Přeloženo z anglického jazyka jako „chute spillway“

² Přeloženo z anglického jazyka jako „stepped spillway“

³ Přeloženo z anglického jazyka jako „bell-mouth spillway“

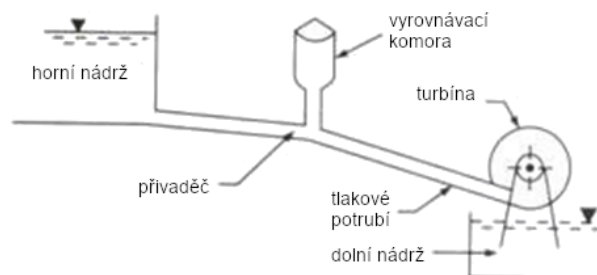
⁴ Přeloženo z anglického jazyka jako „siphon spillway“

1.2 Odběrné zařízení

Odběrná zařízení zprostředkovávají vtok vody a její regulaci z nádrže do přivaděče. U přehradových vodních elektráren jsou odběrná zařízení tlakové, to znamená, že jsou umístěny minimálně 2 m až 3 m pod nejnižší provozní výškou hladiny, aby nedocházelo k nasávání vzduchu do systému. Vtok bývá umístěn v těle přehrady, nebo v nádrži jako samostatný objekt. Jsou vybaveny česlemi, které slouží k zabránění vniku nečistot a ucpání přivaděče. K regulaci průtoku slouží regulační uzávěr a pro rychlé uzavření v případě havárie nouzový uzávěr. [4]

1.3 Přivaděč, vyrovnávací komora, tlakové potrubí

Odběrné zařízení se napojuje na přivaděč, který žene vodu dále do elektrárny. Na přivaděči je instalována vyrovnávací komora. Ta slouží jako bezpečnostní prvek pro ochranu přivaděčného a tlakového potrubí před účinky vodního rázu, který vzniká při každé změně odběru vody.



Obr. 2: Schéma přivaděčného potrubí vodní elektrárny (upraveno) [5]

Tlakové potrubí se nazývá část svodu mezi vyrovnávací komorou a strojovnou. Zpravidla je navrhováno tak, aby bylo co nejkratší z důvodu snížení účinků hydraulických rázů. Tlaková potrubí jsou nejčastěji vyrobena z oceli jako bezešvé, svařované, nebo nýtované trubky, výjimečně mohou být železobetonová. [4]

1.4 Strojovna

Voda z tlakového potrubí proudí dále do strojovny. Strojovna neboli hydrocentrála je část stavby vodní elektrárny, v níž se nachází všechny komponenty a zařízení potřebné k přeměně energie vody na energii elektrickou.

Typická stavba strojovny se skládá ze dvou částí - ze spodní a vrchní stavby. Ve spodní stavbě je uložen přívod a odpad vody, turbína, turbínová kašna a základy generátorů. Vrchní stavba tvoří horní patro spodní stavby a nachází se zde generátory a další zařízení nutné pro výrobu a přenos elektrické energie a zařízení pro řízení a kontrolu toku vody. Transformátory u malých vodních děl jsou také uloženy uvnitř vrchní stavby strojovny, ovšem u velkých děl jsou transformátory z důvodů jejich velikosti umístěny mimo její stavbu. [4]

Turbíny převádějí kinetickou a tlakovou energii vody na mechanickou. Dle směru průtoku vody turbínou můžeme rozlišit turbíny tangenciální, radiální, diagonální a axiální a dle způsobu předání energie na přetlakové (reakční) a rovnotlaké (akční). Přetlakové turbíny přeměňují kinetickou i tlakovou energii vody na kinetickou energii oběžného kola, za oběžným kolem tlak vody klesá. Typickým příkladem přetlakových turbín jsou Francisova a Kaplanova turbína. Naopak rovnotlaké turbíny přeměňují pouze kinetickou energii vody na kinetickou energii oběžného kola. Tlaková energie vody je před oběžným kolem v rozváděcím zařízení přeměněna pouze na energii kinetickou, tedy tlak vody před a za oběžným kolem se nemění. Typickými rovnotlakými turbínami jsou Peltonova a Bánkiho turbína. [4]

1.5 Odpad

Odpad neboli výpusť je koncovou částí vodní elektrárny. Dochází zde k výtoku vody ze strojovny zpět do toku, odpadního kanálu, či odpadní štol.

2 ROZDĚLENÍ ZÁKLADNÍCH TYPŮ HRADIDEL

Hradidla mají široké uplatnění ve vodním inženýrství. Z toho důvodu se liší konstrukcí a samotným provozním účelem. Jejich hlavní funkcí je ovšem zahrazení a kontrola průtoku vody v potrubí, kanálech či na přelivech. Instalovaná hradidla mohou sloužit jako [6] [7] [8]:

- *Regulační hradidla průtoku a výšky horní hladiny*
- *Protipovodňová hradidla*
- *Nouzové uzávěry*
- *Údržbové uzávěry pro odvodnění za účelem údržby*

Regulační hradidla slouží k plynulé regulaci průtoku a výšky hladiny na přelivech jezů či v horních nádržích přehrad. K regulaci dochází změnou efektivní plochy toku potrubím nebo na přelivu. Tyto hradidla mohou být ovládána i při vysokých tlacích a průtocích. Typickým příkladem jsou radiální segmentové a klapkové uzávěry umístěné na přelivu jezu, kde slouží jako pohyblivá koruna pro regulaci průtoku a nezbytné výšky spodní hladiny.

Protipovodňová hradidla se nejčastěji používají na přelivech přehrad a jsou navržena, tak aby jimi byl možný velký průtok vody. Tyto hradidla jsou v provozu méně často a používají se k regulaci velkých průtoků, které mohou nastat v případě povodní či velkých dešťů. Nízko úrovněvé výtokové hradidla mohou také sloužit jako proti povodňová ochrana.

Nouzové uzávěry jsou určeny k operaci při nouzových stavech. Slouží k ochraně zařízení a vybavení, které následují za tímto uzávěrem. Z toho důvodu jsou nejčastěji instalovány na vstupuch přiváděcích potrubí a jsou navrženy tak, aby je bylo možné zavřít při plném průtoku a tlaku proudu vody. Nouzové uzávěry jsou výhradně používány v případě nutnosti rychlého zahrazení toku vody, nebo pro zahrazení a odvodnění toku pro umožnění údržby a kontroly jako u údržbových hradidel. Nouzové uzávěry nejsou vhodné k regulaci.

Údržbová a odvodňovací hradidla se obvykle používají za vyvážených a plánovaných stavů průtoků a výšek hladin. Umožňují zahrazení toku v potrubí či kanálech a tím i jejich vypuštění. Tyto hradidla tedy umožňují přístup k zařízením vyžadujících údržbu či kontrolu, například čerpadel, turbín či jiných armatur. Nejběžnější hradidla používaná k tomuto účelu jsou posuvné a přepážkové brány. K tomuto účelu lze také použít nouzové uzávěry.

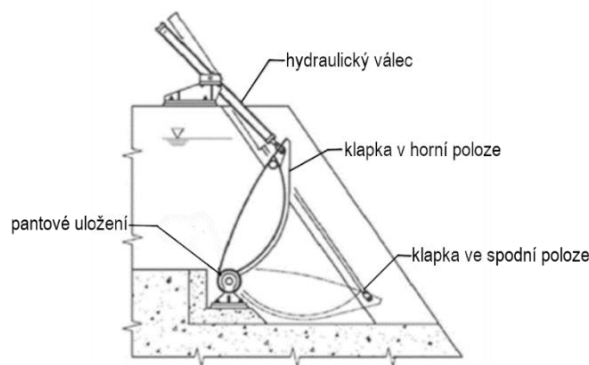
2.1 Jezová klapka⁵

Jezové klapky patří mezi radiální uzávěry. Jsou používány pro regulaci hladiny jezových zdrží, bezpečnostních přelivů přehrad i jako vrata plavebních komor. Klapky se také používají jako nástavba na segmentových uzávěrech a na stavidlech z důvodu lepší regulace přepadového proudu.

Klapkový jezový uzávěr se skládá z klapky, jež je připevněná ke dnu přelivu panty a je zavěšena nebo podpírána nejčastěji hydraulickým válcem. U širších jezových klapek jsou nutností hydraulické válce po obou stranách klapky. Hydraulické válce slouží k ovládnutí klapky, která rotací kolem pantů snižuje či zvyšuje svou hradící výšku.

Výhodou klapkových uzávěrů je možnost jemné regulace hladiny vody přepadem a hladké převádění ledových ker a jiných plovoucích předmětů. Další výhodou těchto uzávěrů je to, že namáhání z klapky je z větší části rozloženo po celé délce spodní stavby jezu, tudíž pilíře nemusejí být tak předimenzovány jako u jiných uzávěrů. [9]

⁵ Přeloženo z anglického jazyka jako „Hinged crest gate“

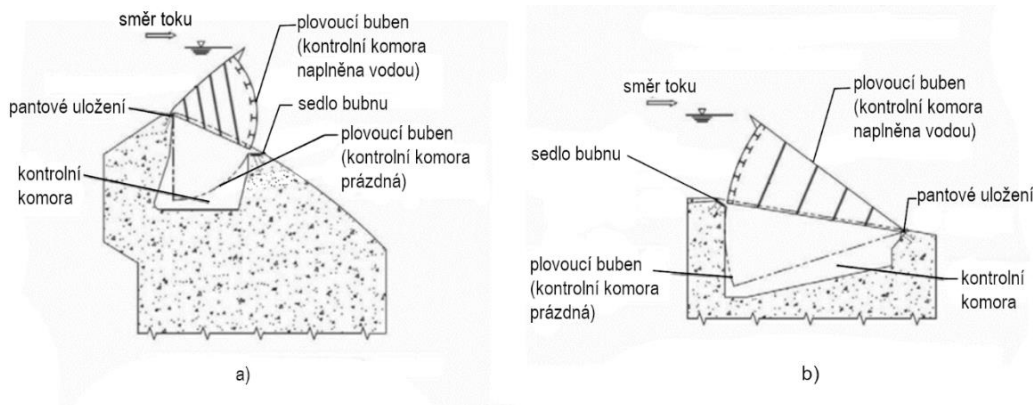


Obr. 3: Jezová klapka (upraveno) [6]

2.2 Bubnové hradidlo⁶

Bubnové hradidla jsou používány na přepadech k regulaci výšky hladiny vody v nádržích. Hradícím prvkem je vodorovně uložený buben, jež plove na hladině. Buben je dutý, utěsněný, je tvořen válcovou čelní plochou, bočními a horní a spodní plochou. Plášť bubnu je vyztužený vnitřní konstrukcí a je zavěšen v betonu stavby ve středu zakřivení válcové plochy. Buben může být zavěšen ve směru nebo proti směru proudu.

K regulaci dochází rotací bubnu v zavěšení. To má za následek zdvižení bubnu nad hranu přelivu pro zvýšení výšky hladiny v nádrži, nebo spuštění bubnu do kontrolní komory v hraně přelivu. Poloha bubnu je řízena ventily umožňující plnění a vypouštění kontrolní komory. V plně snížené poloze je bubnová brána celá ve výklenku kontrolní komory a neblokuje tok vody. [6]



Obr. 4: Bubnové hradidlo zavěšené

a) po směru proudu, b) proti směru proudu (upraveno) [6]

2.3 Segmentový uzávěr⁷

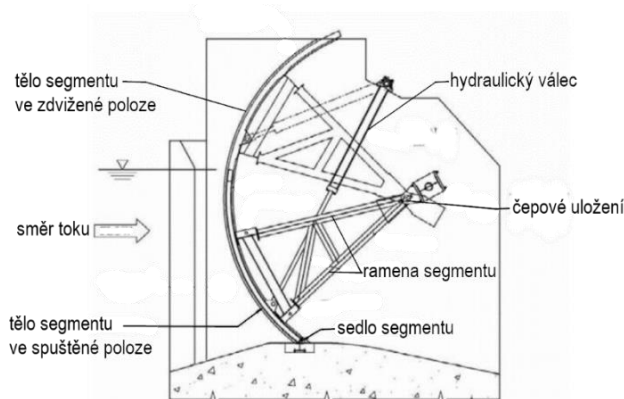
Segmentové uzávěry patří mezi radiální uzávěry a slouží k regulaci vodní hladiny. Na rozdíl od jezových klapek jsou vhodné i pro vyšší spády.

⁶ Přeloženo z anglického jazyka jako „Drum gate“

⁷ Přeloženo z anglického jazyka jako „Tainter gate“

Hradicím tělesem segmentových uzávěrů je část válcové plochy neboli segment. Segment se otáčí zpravidla kolem osy své válcové plochy. Hradicí válcová plocha je vyztužena příčníky a podélníky a je podepřena nosnou konstrukcí a rameny na obou stranách konstrukce. Ramena jsou v ose otáčení opatřena samomaznými ložisky, kterými se zatížení přenáší do stavby jezu nebo přehrady. Ovládání uzávěru bývá zpravidla umístěno nad tělesem segmentu. Uzávěr je ovládán hydraulickými válci nebo lanovými, řetězovými či bubnovými navijáky. [6]

Segmentové uzávěry mohou být zdvižné i spustné. U zdvižných segmentů dochází k regulaci horní hladiny výtokem pod tělesem a u spustných k regulaci přelivem přes hradicí těleso. Často jsou využívány segmentové uzávěry s klapkou pro lepší regulovatelnost a pro větší hrazené výšky. [9] [10]



Obr. 5: Segmentový uzávěr (upraveno) [6]

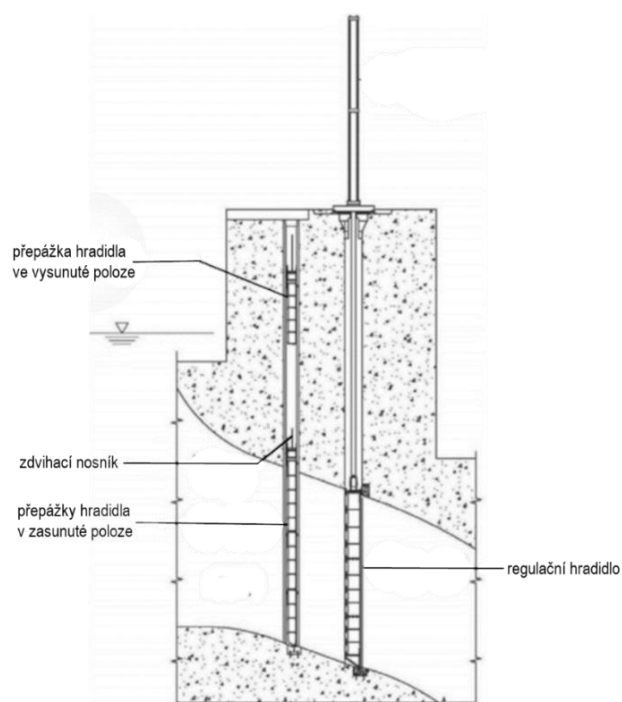
2.4 Přepážková hradidla⁸

Přepážková hradidla jsou jednoduchá a velmi často používaná hradidla. Nejčastěji se využívají k odvodnění potrubí a kanálů za účelem údržby a za určitých okolností při nouzových stavech lze tyto hradidla použít i jako nouzový uzávěr v případě, že není k dispozici jiná možnost zahrazení toku.

Přepážková hradidla se skládají z ocelových, betonových nebo dřevěných desek vyztužených ocelovými příčníky a zasouvají se do drážek betonu stavby, jež je drží na místě. Těsnění je zajištěno pryžovým těsněním po obvodu desky. Tyto hradidla se mohou skládat z jednodílné přepážky nebo z několika vícedílných přepážek. Vícedílné přepážky jsou konstrukčně stejné jako jednodílné, instalují se ve vodorovné poloze na sebe pomocí zarovnávacích kolíků a používají se v aplikacích s omezenou zdvihací kapacitou manipulačního zařízení či v aplikacích, kdy je vyžadována nízká manipulační výška. Některé přepážky jsou vybaveny plnicími ventily, jenž slouží před jejím odstraněním k zavodnění oblasti za hradidlem. Dochází tedy k vyrovnání výšek spodní a horní hladiny a tím pádem i hydrostatických sil.

Přepážková hradidla jsou nejčastěji instalována a odstraňována pomocí portálových nebo mobilních jeřábů a mohou být zasouvány pomocí vodících zařízení nebo manuálně naváděny při jejich instalaci. [6] [10]

⁸ Přeloženo z anglického jazyka jako „Bulkhead gate and stop logs“



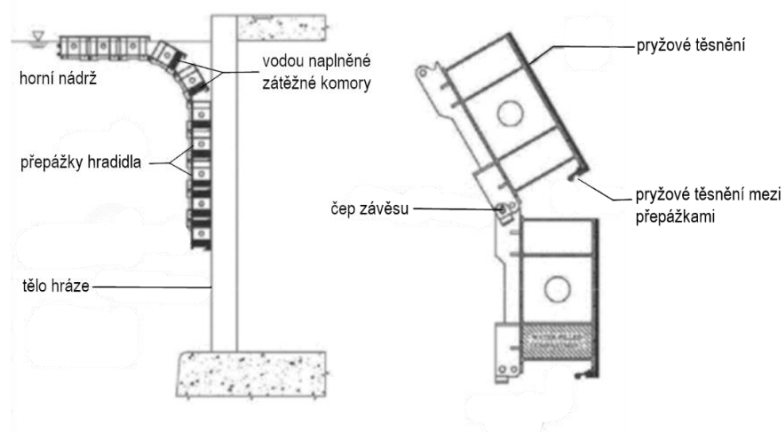
Obr. 6: Vicedílné přepážkové hradidlo (upraveno) [6]

2.5 Plovoucí přepážková hradidla⁹

Plovoucí přepážková hradidla jsou používána k odvodňování přelivových bran či uzavírání vtoků přehradových elektráren. Využívají se pro umožnění přístupu při kontrole a údržbě stavby přehrady, bran a jiných zařízení, kde je aplikace konvenčních přepážkových hradidel nemožná nebo neekonomická.

Tyto hradidla mohou být jednodílná či sklopná vicedílná. Skládají se z dutých hradicích elementů s integrovanou zátěžnou komorou. Zátěžná komora je dle potřeby plněna vodou či vzduchem pro ponoření hradidla k hrazenému místu či jeho vynoření a otevření průtoku.

Výhodou aplikace těchto hradidel je to, že není potřeba externího zdvihacího zařízení k jejich manipulaci a také to, že jsou snadno přemístitelné mezi jednotlivými branami nebo vtoky. Tím pádem jedno plovoucí přepážkové hradidlo může být postupně použito k odvodnění více bran či vtoků. [6] [10]



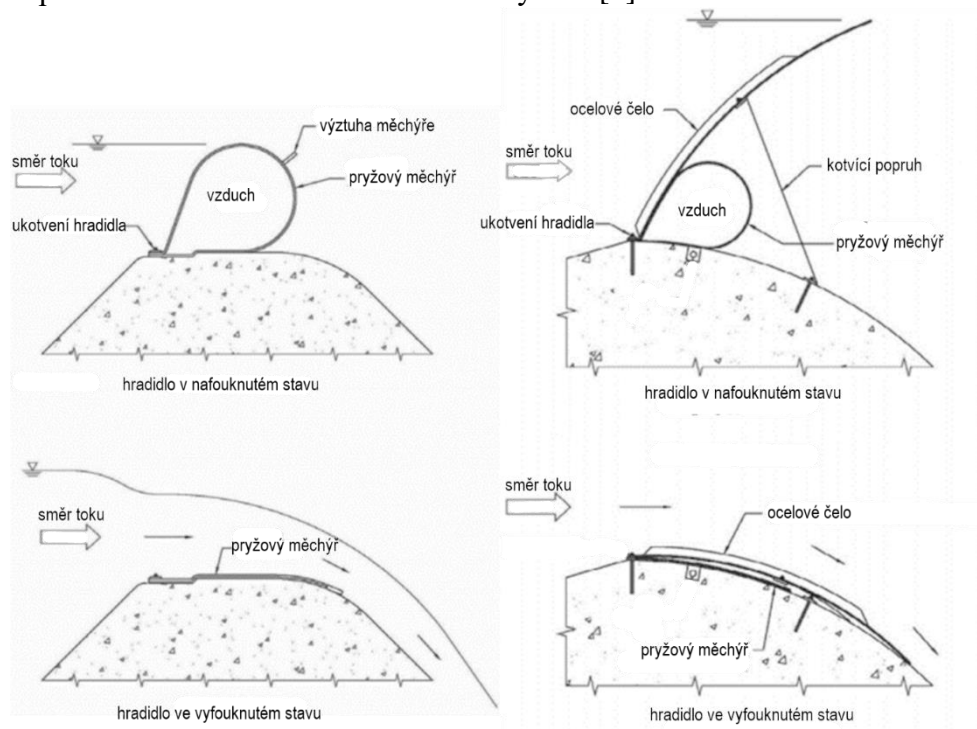
Obr. 7: Plovoucí přepážkové hradidlo a detail přepážky hradidla (upraveno) [6]

⁹ Přeloženo z anglického jazyka jako „Floating bulkhead gate“

2.6 Nafukovací hradidlo¹⁰

Nafukovací hradidla jsou instalovány na hřebenech přelivů, přehrad nebo jiných vodních kanálů. Jejich primární funkcí je udržování výšky hladiny nebo její dočasné zvýšení. Sekundárně také slouží jako bariéra pro zachycení plovoucích nečistot a ledu.

Jejich funkci zajišťuje nafukovací pryžový měchýř válcového tvaru, jenž je uchycen na horní hraně hřebenu a postranních stěnách stavby. Existují dva běžně používané typy těchto hradidel a to nafukovací pryžové hradidlo a nafukovací pryžové hradidlo s ocelovým čelem. První typ využívá k zahrazení toku nafouknutý pryžový měchýř, kdežto druhý využívá ocelové čelo, které je podpírané a ovládané nafukovacím měchýřem. [6]



Obr. 8: Nafukovací pryžové hradidlo a nafukovací pryžové hradidlo s ocelovým čelem v nafouknutém a vyfouknutém stavu (upraveno) [6]

2.7 Posuvné hradidlo¹¹

Posuvná hradidla jsou velmi často využívána v aplikacích vyžadujících nižší až střední spády hladin. Používají se k regulaci průtoku a mohou sloužit i jako nouzový uzávěr, či k odvodnění potrubí a kanálů pro umožnění údržby a kontroly strojních zařízení nebo stavby samotné.

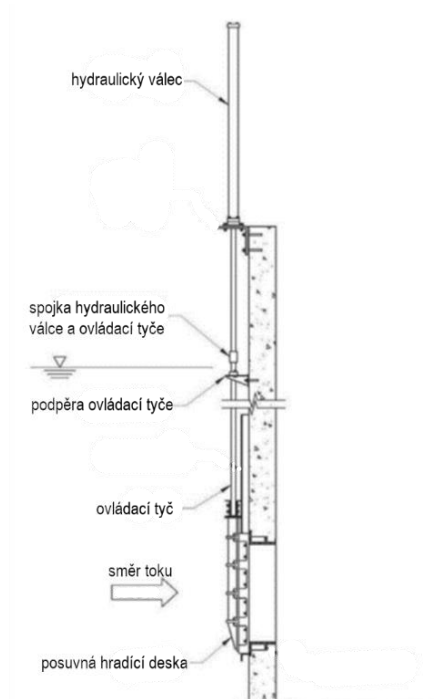
Konstrukce posuvných hradidel patří mezi jednodušší. Skládají se z nerezové ocelové hradící desky, která je podpírána ve vodících drážkách stavby hradidla a je vyztužena rámem s hlavními horizontálními a sekundárními vertikálními nosníky.

Pro snížení třecího odporu při manipulaci hradidlem, boční stěny rámu dosedají na lištu z klzného materiálu zapuštěnou do betonu stavby. Jako klzný materiál se používá nejčastěji bronz, fluorokarbon nebo polymer s ultra vysokou molekulovou hmotností. Těsnění může být zajištěno pryžovým těsněním nebo právě kontaktem hradidla s klzným materiálem lišty – tento případ těsnění je často používán při užití bronzu či fluorokarbonu jako klzného materiálu lišty.

¹⁰ Přeloženo z anglického jazyka jako „Inflatable gate“

¹¹ Přeloženo z anglického jazyka jako „Slide gate“

Posuvná hradidla vyžadují systém umožňující jak hradidlo vytahovat vzhůru, tak jej i tlačít dolů. Z toho důvodu se výhradně používají hydraulické válce nebo závitové tyče. [6] [10]



Obr. 9: Posuvné hradidlo (upraveno) [6]

2.8 Kapotované hradidlo¹²

Kapotovaná hradidla jsou typem posuvných hradidel, jež nevyžadují šachtu pro ovládací zařízení vedoucí na až volný povrch. Často jsou používány u nízko úrovnových vtoků a výpustí, kde je nepraktické nebo nemožné umístit ovládací šachtu. Kapotovaná hradidla umístěná na vtoku slouží k zastavení průtoku či pro jeho uzavření a umožnění údržby a kontroly zařízení či stavby. Kapotovaná hradidla na výtoku se používají k regulaci odtoku vody.

Hradidla se skládají z tlakové skříně (kapoty), hradicí desky, ovládacího zařízení a z horního a spodního tělesa před a za hradicí deskou. Kapota a horní a spodní těleso hradidel je uloženo v betonu. Hradicí deska je v otevřené poloze uložena v krytu kapoty, čímž nepřekáží proud vody. Ovládacím zařízením jsou nejčastěji hydraulické válce. Závitové tyče lze také použít k ovládání těchto typů hradidel, nicméně jejich využití je méně časté. [6]

Mezi kapotovaná hradidla patří:

- *Kapotované posuvné hradidlo*¹³
- *Prstencové hradidlo*¹⁴
- *Tryskové hradidlo*¹⁵

¹² Přeloženo z anglického jazyka jako „Bonneted gate“

¹³ Přeloženo z anglického jazyka jako „Bonneted slide gate“

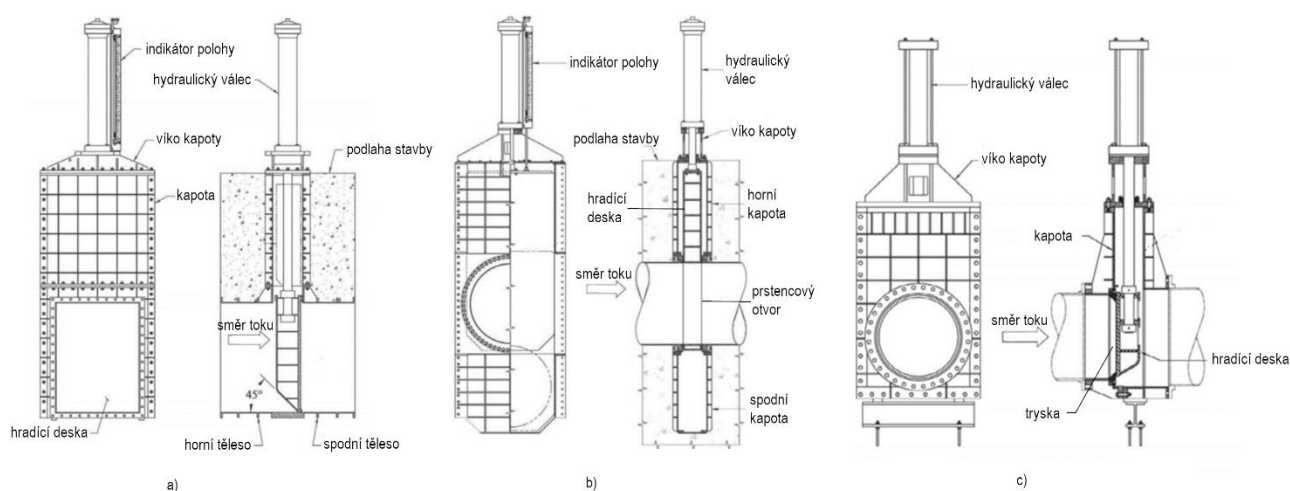
¹⁴ Přeloženo z anglického jazyka jako „Ring-follower gate“

¹⁵ Přeloženo z anglického jazyka jako „Jet-flow gate“

Kapotovaná posuvná hradidla se výlučně používají v potrubí s obdélníkovým průřezem. Jsou vhodná k uzavření a odvodnění potrubí na vtoku či k regulaci průtoku na výtoku. Hradicím elementem je obdélníková vyztužená deska.

Prstencová hradidla jsou používána jako uzávěry potrubí s kruhovým průřezem. Tyto hradidla neslouží k regulaci toku. Hradicí deska se skládá ze dvou částí – z horní vyztužené desky a spodního sledujícího prstence. V uzavřené poloze deska zahrazuje průtok potrubím a spodní prstenec je uložený ve spodní části kapoty. V otevřené poloze je deska uložena v horní části kapoty a prstenec soustředně dosedá na potrubí a tvoří nerušený souvislý průchod.

Trysková hradidla se používají k regulaci průtoku na výtoku z potrubí kruhových průřezů. Hradicím elementem je deska, jež hradí kruhový otvor ve formě komolé kuželové trysky. Výhodou této konstrukce je značné snížení vzniku kavitace a vibrací hradicí desky uzávěru, která jinak vzniká nesouvislou cestou způsobenou drážkou pro hradicí těleso.



Obr. 10: Kapotovaná hradidla

a) kapotované posuvné hradidlo, b) prstencové hradidlo, c) tryskové hradidlo (upraveno) [6]

2.9 Tabulové hradidlo¹⁶

Tabulová hradidla jsou vertikální nebo téměř vertikální zdvihací hradidla. Používají se jako vstupní či výstupní uzávěry přiváděcích potrubí nebo jako uzavírací či regulační členy u přepadů. Mohou být provozovány pod plným či částečným spádem hladin a slouží k nouzovému uzavření, uzavření při údržbě, či jako protipovodňové opatření a v některých případech je lze použít i k regulaci průtoku.

Hradidlo se skládá z ploché desky z konstrukční oceli s vodícími koly nebo válečky po obou stranách. Deska je vyztužena rámem s vodorovnými nosníky a sekundárními výztužnými prvky. Do rámu sestavy jsou napojena vodící kola a válečky, jež dosedají na kolejnice nebo vodící drážky ve stěnách kanálu. V závislosti na konstrukčním provedení jsou tyto hradidla buď těsnící proti proudu, nebo těsnící po proudu. [6]

Vodící kola a válečky slouží k minimalizaci tření při operaci s hradidlem. Tyto hradidla se používají tam, kde je vyžadováno jejich uzavření pouze pomocí gravitace nebo kde hydraulické síly a tření jsou tak velké, že aplikace posuvných hradidel by byla již neefektivní. Hradidla určená pro gravitační uzavření jsou nejčastěji vybavena bubnovým navijákem nebo jiným zdvihacím

¹⁶ Přeloženo z anglického jazyka jako „Wheel and roller mounted gate“

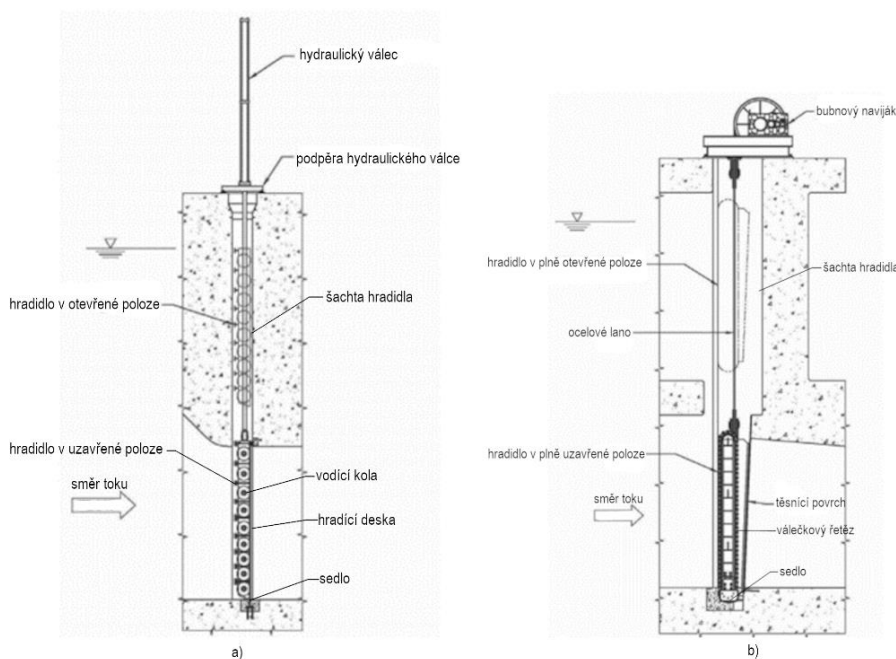
mechanismem pro jejich opětovné vytažení do otevřené polohy. Ovšem hradidla neumožňující uzavření pomocí gravitace musí být vybavena zařízením umožňující jak jejich vytažení tak i jejich spuštění. Pro tyto případy jsou nejčastěji využívány hydraulické válce nebo závitové tyče. [10]

Dva nejčastější typy těchto hradidel jsou:

- *Tabulová hradidla s vodícími koly*¹⁷
- *Tabulová hradidla s válečky*¹⁸

Hradidla s vodícími koly mají řadu nezávislých kol namontovaných na obou bocích. Kola přenášejí zatížení od tlaku vody na zapuštěné kolejnice do betonu stavby a oproti kluznému tření u posuvných hradidel poskytují nízký valivý odpor při otevírání či zavírání hradidla. Kola vybavena válečkovými ložisky, kluznými bronzovými pouzdry nebo samomaznými pouzdry pro snížení tření v nápravách kol.

Hradidla s válečky mají dva kontinuální řetězy odvalujících se nerezových válečků situovaných po obou bocích hradidla. Válečky jsou mezi sebou spojeny čepy a postranními lištami. Oproti hradidel s koly mají válečky menší průměr a jsou umístěny blízko sebe, což znamená více kontaktních bodů pro přenos hydraulického zatížení do vodících drážek válečkových řetězů v betonu stavby. Proto se tyto hradidla obvykle používají v aplikacích s vyššími spády než u hradidel s vodícími koly. [6] [10]



Obr. 11: Tabulová hradidla

a) tabulové hradidlo s vodícími koly, b) tabulové hradidlo s válečky (upraveno) [6]

¹⁷ Přeloženo z anglického jazyka jako „Wheel-mounted gate“

¹⁸ Přeloženo z anglického jazyka jako „Roller-mounted gate“

3 TEORIE MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ

Výpočtové modelování proudění neboli CFD (Computational Fluid Dynamics) slouží k simulaci skutečných hydraulických jevů na modelu. Model je zde definován jako prostor ohraničený okrajovými podmínkami, na němž je hydraulický děj simulován. Modely mohou být dle složitosti jevu prostorové, dvourozměrné, či v nejjednodušších případech jednorozměrné. Ke správnému sestavení modelu je nutné správně definovat všechna vstupní data výpočtu a správně určit okrajové podmínky. Oproti skutečnosti jsou často do výpočtových modelů zaváděna nutná zjednodušení a omezení za účelem snížení časové náročnosti výpočtu. Proto výsledky výpočtů mohou popisovat skutečnost částečně zkresleně. Tato zjednodušení jsou vhodná, pokud je složitost simulovaného jevu umožňuje, či pokud jsou výsledky z jednoduššího modelu pro danou simulaci dostačující.

Samotný výpočet spočívá v řešení soustav parciálních diferenciálních rovnic řešených iteračně pomocí numerických metod. Metody konečných diferencí, konečných prvků nebo konečných objemů zajišťují časovou a prostorovou diskretizaci soustavy parciálních diferenciálních rovnic na soustavu algebraických rovnic. Výsledkem řešení této soustavy rovnic na elementech výpočtové sítě jsou okamžité bodové hodnoty charakteristik proudění. [11] [12]

Výpočetní síť se skládá ze síťových uzlů a elementů. Síťové elementy jsou dle modelu prostorové, plošné nebo uzlové buňky. Za kvalitní síť je považována taková, která dokáže dobře zachytit simulovaný jev a přitom obsahuje minimální množství geometricky i rozměrově vhodných elementů. Časová náročnost simulace roste s větším počtem buněk v jemnějších výpočetních sítích.

Pro CFD simulace je z nabízených numerických metod nejvhodnější použít metodu konečných objemů. Metoda konečných objemů řeší soustavu numerických rovnic v jednotlivých konečných objemech výpočtové sítě. Řídící rovnice výpočtu jsou rovnice zákona zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Tyto rovnice jsou dále doplněny pomocnými semi-empirickými vztahy například pro popis vlivu turbulence. [12]

3.1 Zákon zachování hmotnosti

Zákon zachování hmotnosti popisuje rovnice kontinuity. Rovnice kontinuity pro stlačitelnou kapalinu je ve tvaru

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0. \quad (3.1)$$

V případě proudění nestlačitelné kapaliny je člen $\frac{D\rho}{Dt} = 0$, tedy po úpravě je rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.2)$$

kde ρ je hustota kapaliny, t je časový krok, v_i je rychlost proudění, x_i je vzdálenost a index i udává směr v kartézských souřadnicích, kde i je roven 1, 2, 3.

3.2 Zákon zachování hybnosti

Zákon zachování hybnosti a zákon zachování energie popisují proudění reálných, viskózních kapalin. Na rozdíl od ideálních kapalin, při proudění kapalin reálných dochází k disipaci energie

vnitřním třením a ke sdílení tepla v tekutině. Disipace je způsobena vzájemným ovlivňováním částí tekutiny, které se pohybují mezi sebou různými rychlostmi. Z termodynamického hlediska je disipace nevratným dějem. [13]

Navier-Stokesova rovnice reálné kapaliny popisuje zákon zachování hybnosti. Při pohybu reálné viskózní kapaliny dochází ke vzniku vnitřního tření v kapalině. Síly vyvolané vnitřním třením jsou podmíněny přenosem hybnosti určitou plochou, tím pádem je lze považovat za síly plošné a lze tedy hovořit o třecím (viskózním) napětí. Toto napětí vystupuje v rovnici jako tenzor třecího napětí τ_{ij} . Navier-Stokesova rovnice reálné kapaliny je ve tvaru

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (3.3)$$

kde v je rychlost proudění, x vzdálenost, ρ hustota kapaliny, t časový krok, G_i vektor vnějších zrychlení, p tlak, τ_{ij} je tenzor třecích napětí a indexy i a j udávají směr v kartézských souřadnicích a jsou rovny 1, 2, 3. Při laminárním proudění lze vyjádřit tenzor třecího napětí pomocí Newtonova zákona viskozity

$$\tau_{ij} = \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (3.4)$$

kde μ je dynamická viskozita a člen $\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ představuje změnu rychlosti v_i v kolmém směru x_j . Uvažováním nestlačitelné kapaliny a dosazením rovnice kontinuity (3.2) a Newtonova zákona viskozity (3.4) a do rovnice (3.3) získáme Navier-Stokesovu rovnici pro nestlačitelnou viskózní kapalinu

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (3.5)$$

3.3 Zákon zachování energie

Poslední řídicí rovnicí je zákon zachování energie. Zákon zachování energie je popsán pomocí entalpie h ve tvaru

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h v_j) = \frac{\partial p}{\partial t} + v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j}, \quad (3.6)$$

kde $\tau_{ij} \partial v_i / \partial x_j$ představuje disipační funkci energie vlivem vazkosti a q_j je tok tepla. Tok tepla lze vyjádřit Fourierovým zákonem e tvaru

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (3.7)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti a $\partial T / \partial x_j$ je teplotní gradient média. [11]

3.4 Určení charakteru proudění

Dalším důležitým faktorem v modelování proudění je správné určení charakteru proudění. Proudění může být laminární, přechodové, nebo turbulentní. K laminárnímu proudění obecně dochází při nízkých rychlostech pohybu kapaliny, kdy se kapalina pohybuje v tenkých souběžných vrstvách, mezi kterými nedochází k mísení částic kapaliny. Typicky laminární proudění nastává v mezní vrstvě v blízkosti povrchů stěn. Turbulentní proudění obecně nastává při vyšších rychlostech pohybu kapaliny nebo vlivem geometrie modelu, kde dochází ke vzniku turbulentních

vírů. Tyto vzniklé turbulence mají za následek nepravidelné změny bodových rychlostí a tlaků částic v kapalině. Kritériem pro stanovení charakteru proudění je Reynoldsovo číslo Re , které je rovno

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot L}{\nu}, \quad (3.8)$$

kde \bar{v} je střední hodnota rychlosti proudění, L je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita. Pokud je Reynoldsovo číslo nižší než kritická hodnota, proudění je laminární a pokud je vyšší než kritická hodnota, jedná se o proudění turbulentní. Kritická hodnota Reynoldsova čísla je různá pro rozdílné aplikace a je často stanovována experimentálně.

3.5 Modely turbulence

Pro modelování turbulentního proudění existují tři hlavní metody – metoda přímé numerické simulace DNS, tzv. *Direct Numerical Simulation*, metoda velkých vírů LES, tzv. *Large Eddy Simulation* a metoda časového středování RANS, tzv. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*.

3.5.1 Metoda přímé numerické simulace DNS

Metoda přímé numerické simulace DNS řeší přímo rovnici kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice pro celé spektrum velikostí turbulentních vírů bez zjednodušujících modelů turbulence, a tím pádem poskytuje dokonalý obraz fyziky proudící tekutiny. Tato metoda však vyžaduje extrémně jemnou síť, kde velikost buněk musí řádově odpovídat velikosti nejmenších vírů. Velmi vysoké nároky na výpočtovou síť a velmi malý časový krok simulace prozatím vede k technické nepoužitelnosti této metody v inženýrských výpočtech. [14]

3.5.2 Metoda velkých vírů LES

Metoda velkých vírů LES je založena na řešení pohybových rovnic velkých turbulentních vírů a nahrazením malých vírů doplňkovými modely. Při výpočtu tedy dochází k rozdělení a filtraci turbulentního pole na velké a malé turbulentní víry. Výhodou LES oproti DNS je možnost použití hrubší výpočtové sítě a většího časového kroku. Ovšem oproti metodám RANS jsou nároky na výpočetní síť a samotný výpočet vysoké. [14]

3.5.3 Metoda časového středování RANS

Metoda časového středování RANS spočívá v časovém středování okamžitých hodnot rychlostí a tlaků proudící kapaliny, kde okamžitá rychlost v je rovna $v = \bar{v} + v'$ a okamžitý tlak p je roven $p = \bar{p} + p'$, kde \bar{v} a \bar{p} jsou střední rychlost a střední tlak v kapalině a v' a p' jsou okamžité výchylky od střední rychlosti a tlaku.

Využitím Reynoldsových pravidel středování a dosazením do (3.2) a (3.5) získáme rovnici kontinuity a Navier-Stokesovu rovnici ve tvaru

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \bar{v}_j = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{\partial x_j} (\overline{v'_i v'_j}) \quad (3.10)$$

kde člen $\overline{v_i' v_j'}$ odpovídá Reynoldsovu tenzoru napětí, jehož vznik souvisí s fluktuacemi rychlosti. Reynoldsův tenzor napětí může být dále zjednodušen Boussinesquovou hypotézou a modely turbulence nebo řešen přímo sestavením transportních rovnic [14].

4 SIMULACE HRAZENÍ TOKU VE SLAPY

Simulace hrazení toku byly provedeny na modelu vodní elektrárny Slapy. Nouzovým uzávěrem na VE Slapy je tabulový uzávěr. Zdvih tabulového uzávěru je realizován prostřednictvím hydraulického válce. Spouštění uzávěru jeho vlastní vahou je ovlivněno odtokem hydraulického oleje z prostoru válce. Iniciační síla při spouštění uzávěru je gravitační, zbylé síly působí spolu nebo proti ní. V následujících výpočtech byly provedeny simulace s konstantní rychlostí pohybu uzávěru a simulace pádu uzávěru do plného průtoku. V simulaci pádu uzávěru není uvažován vliv hydraulického válce, jedná se pouze o zavírání vlivem gravitace a sil vyvolaných proudící kapalinou. V obou simulacích je zohledněn vliv třecí síly.



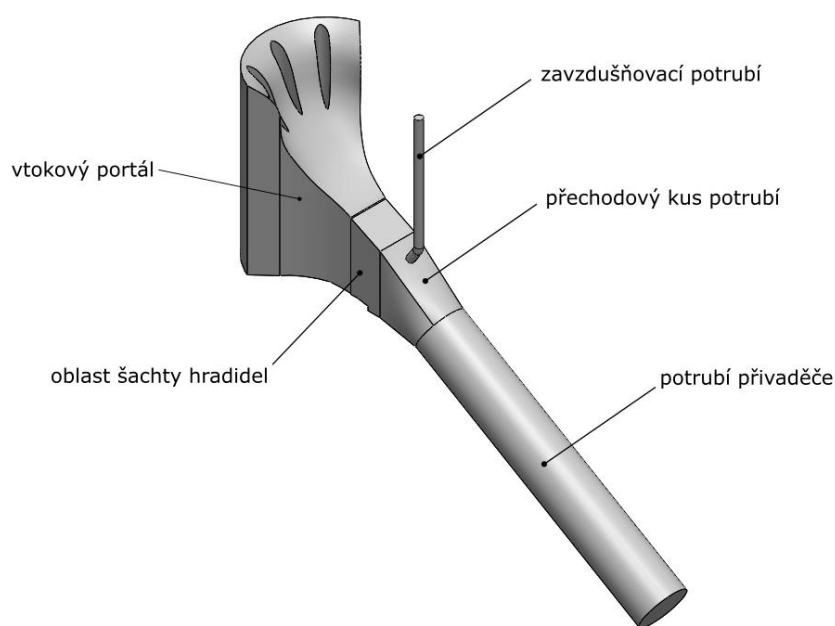
Obr. 12: Instalace tabulového uzávěru na VE Slapy [15]

4.1 Geometrie modelu

Na základě obdržené výkresové dokumentace hráze přehrady a rychlouzávěru na VE Slapy byly vytvořeny modely vtoku v softwaru Solidworks a AnsysDesignModeler pro následující výpočty. První z modelů je prostorový model vtoku, druhý je zjednodušený dvourozměrný model.

4.1.1 Popis 3D modelu

Prostorový model vtoku byl vytvořen v softwaru Solidworks za účelem ujasnění představy o geometrii vtoku. Následující simulace zavírání tabulového uzávěru na tomto modelu nebyly provedeny z důvodu náročnosti výpočtu. Výpočet zavírání uzávěru na prostorovém modelu je nad rámecem možností diplomové práce.



Obr. 13: Zjednodušený model vtoku vodní elektrárny Slapy

Model vtoku VE Slapy se skládá z vtokového portálu, šachty hradidel, přechodové části potrubí, zavzdušňovacího potrubí a z potrubí přivaděče, viz obr. 13. Tabulový uzávěr je zobrazen na obr. 12 výše. Jedná se o uzávěr složený ze tří dílů s dvanácti vodícími koly. Uzávěr je vyroben z konstrukční oceli, je svařen z ocelových plátů a nosných a výztužných profilů. Váha uzávěru je 41 080 kg. Těsnění uzávěru zajišťuje pryžová těsnicí guma na spodním prahu uzávěru a po obvodu zadní desky uzávěru.

Maximální a minimální geodetické provozní výšky horní hladiny v nádrži VE Slapy jsou 271 m a 247 m. Práh vtokového portálu hráze se nachází v geodetické výšce 229 m. Portál je na vstupu vysoký 12,7 m, široký 13 m a je podpírán třemi podpůrnými pilíři. Portál je následně napojen na šachtu hradidel, délka portálu je 11,2 m. V šachtě hradidel je umístěno primární hradidlo a nouzový tabulový uzávěr s vodícími a ovládacími prvky. Pro zachování přehlednosti prostorového modelu, v obr. 13 není zobrazena podrobná geometrie šachty. Rozměry průtočného kanálu šachty na jejím výstupu jsou 6,65 m na výšku a 4 m na šířku. Tento profil následně přechází přechodovým kusem potrubí na kruhový profil přivaděče o průměru 5 m. Přechodový kus potrubí je dlouhý 5,75 m. Na přechodový kus potrubí je napojeno zavzdušňovací potrubí o průměru 0,8 m. Potrubí přivaděče je položeno se sklonem 10:17 a je modelované v délce 30 m.

V prostorovém modelu vtoku jsou zahrnuty:

- *Vstupní portál přehrady*
- *Podpůrné pilíře vstupního portálu*
- *Sedla primárního uzávěru a rychlouzávěru*
- *Zavzdušňovací potrubí*
- *Přechodový kus potrubí*
- *Potrubí přivaděče*

Naopak prostorový model nezahrnuje:

- *Horní nádrž s volnou hladinou*
- *Prvky vodní elektrárny, které se nacházejí za potrubím přivaděče*
- *Podrobná geometrie šachty hradidel*
- *Primární hradidlo a tabulový uzávěr*
- *Česle vtoku*
- *Drážky pro umístění česlí v podpůrných pilířích*
- *Ovládací zařízení primárního hradidla a nouzového uzávěru*

4.1.2 Popis 2D modelu

Dvourozměrný model byl vytvořen na základě 3D modelu a následně upraven v softwaru AnsysDesignModeler. Jedná se o podélný řez středem vtoku hráze a uzávěru. Tento model byl vytvořen za účelem následujících CFD simulací.

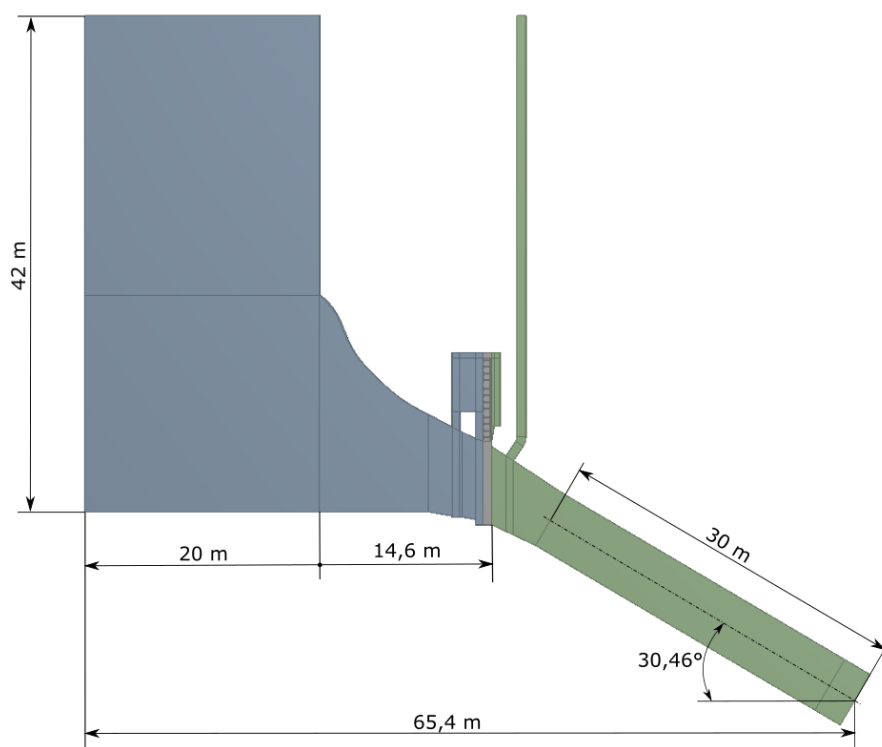
Dvourozměrný model je zobrazený na obr. 14 a detail uložení tabulového uzávěru v horní poloze na obr. 15 níže. V tomto modelu je zahrnuta část horní nádrže s uvažovanou maximální provozní hladinou na VE Slapy a také část šachty hradidel s umístěným tabulovým uzávěrem. Šachta hradidel byla modelovaná pouze z části z důvodu ušetření počtu buněk ve výpočetní síti. Uzávěr se v horní poloze nachází 0,47 m nad horní hranou průtočného kanálu vtoku. Jelikož se jedná o dvourozměrný model, jsou zde zanedbány veškeré prostorové prvky geometrie a prvky nenacházející se v řezu středem hráze. V modelu je také zanedbaný středový podpůrný pilíř, který se nachází v podélném řezu hrázi.

V dvourozměrném modelu jsou zahrnuty:

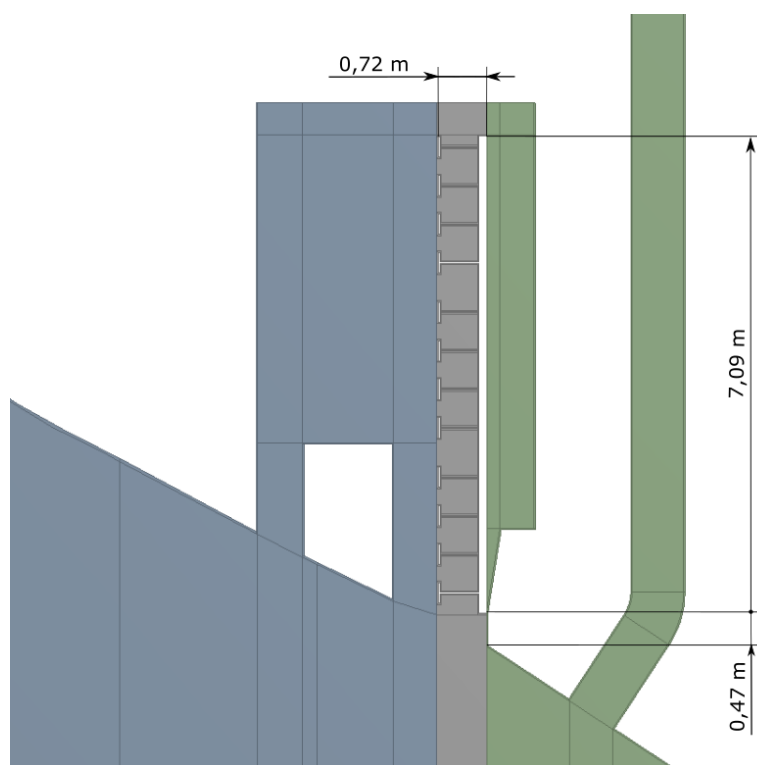
- *Část horní nádrže s uvažováním maximální provozní výšky hladiny*
- *Vstupní portál přehrady*
- *Sedla primárního uzávěru a rychlouzávěru*
- *Část šachty hradidel*
- *Zavzdušňovací potrubí*
- *Přechodový kus potrubí*
- *Potrubí přivaděče za rychlouzávěrem o délce 30 metrů*

V dvourozměrném modelu jsou zanedbány:

- *Prvky nenacházející se v podélném řezu středem hráze*
- *Prvky vodní elektrárny, které se nacházejí za potrubím přivaděče*
- *Středový podpůrný pilíř vstupního portálu*
- *Primární hradidlo*
- *Část horní nádrže nacházející se pod vstupem do vtoku*
- *Ovládací zařízení primárního hradidla a nouzového uzávěru*



Obr. 14: Dvourozměrný model přivaděče s částí horní nádrže



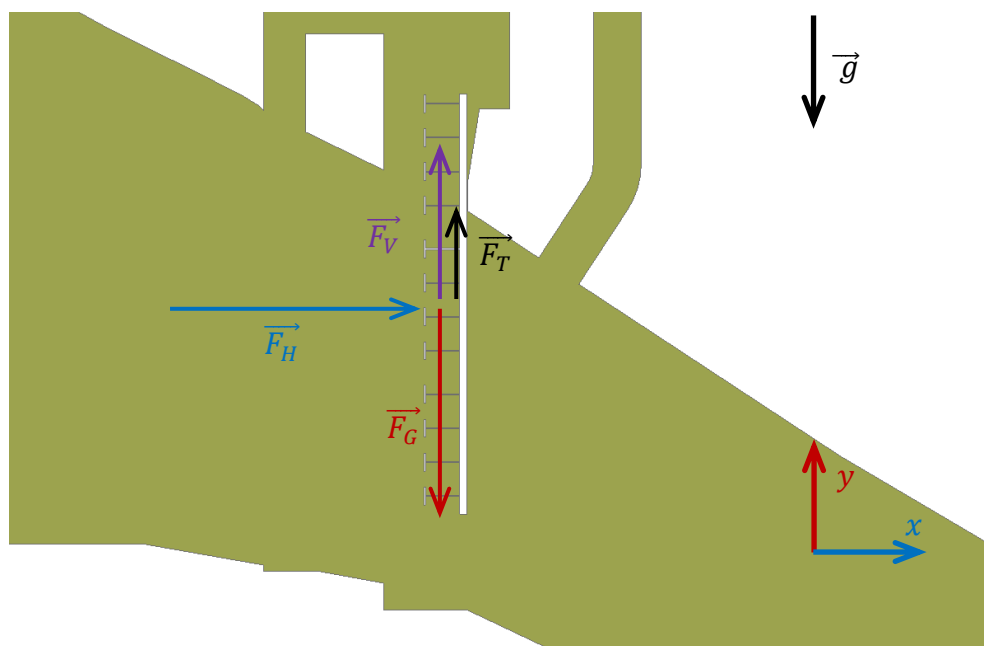
Obr. 15: Detail uložení tabulového uzávěru v dvourozměrném modelu

4.2 Rozbor sil působících na tabulový uzávěr

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 4, tabulový uzávěr na VE Slapy je ovládán hydraulickým válcem. Hydraulický válec zajišťuje vytažení uzávěru do horní polohy a ovlivňuje také jeho

spouštění při zavírání. Rychlost pohybu uzávěru před dovřením je z důvodu možného porušení sedla významně snížena. Jedním z cílů této práce je ověřit hrazení toku pádem uzávěru do plného průtoku vlivem gravitace. Z tohoto důvodu není vliv hydraulického válce v následujících silových rozborech uvažován. Avšak v běžných podmínkách provozu je spouštění uzávěru ovlivňováno rychlostí odpouštění oleje z prostoru hydraulického válce. Parametry hydraulického válce a připojeného hydraulického okruhu nebyly součástí zadání, ale bylo by možné je případně ve formě matematického modelu válce a síly působící na uzávěr do stávající simulace zahrnout.

Při gravitačním zavírání pro úplné dovření a zahrazení toku je nutné, aby výslednice sil působících na uzávěr ve směru zavírání byla záporná. Síly působící na uzávěr jsou znázorněny v obr. 16 níže. Na uzávěr působí tíhová síla F_G , horizontální a vertikální síly od kapaliny F_H a F_V a třecí síla těsnění a v ložiscích kol F_T .



Obr. 16: Síly působící na tabulový uzávěr

Sestavením silové rovnováhy v ose zavírání lze vyjádřit výslednici sil F , která na tabulový uzávěr působí. Výslednice sil je rovna

$$F = -F_G + F_V + F_T, \quad (4.1)$$

kde tíhová síla F_G a třecí síla F_T jsou rovny

$$\begin{aligned} F_G &= m \cdot g, \\ F_T &= -\text{sgn}(v_y) \cdot f \cdot |F_H|, \end{aligned} \quad (4.2)$$

kde hmotnost uzávěru m je 41080 kg, g je gravitační zrychlení, $\text{sgn}(v_y)$ vyjadřuje orientaci pohybu uzávěru a v třecím koeficientu f je zahrnuto tření mezi vodícími koly s jejich vedením a také tření pryžového těsnění. Hodnota třecího koeficientu byla zvolena 0,01 dle [8]. Síly od proudící kapaliny F_V a F_H jsou rovny součtu tlakových a viskózních sil působících na uzávěr. Tyto síly jsou získány řešením rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu (3.2) a Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelnou viskózní kapalinu (3.5) v numerickém řešiči AnsysFluent.

4.3 Výpočetní síť

Výpočetní síť byla vytvořena v programu AnsysMeshing. Jedná se o převážně strukturovanou síť z čtyřúhelníkových prvků, malá oblast nacházející se v šachtě hradidel je tvořena trojúhelníkovými prvky. Počet prvků sítě byl omezen možnostmi studentské licence. Bez tohoto omezení by jinak bylo možné počet prvků sítě navýšit. Síť se skládá z 503 527 elementů a je zobrazena v příloze A.

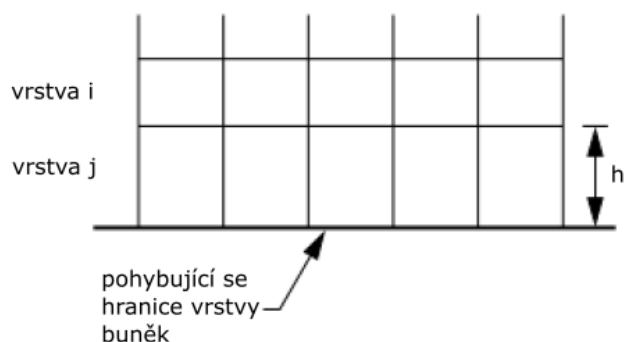
Pro simulaci pohybu uzávěru byla vytvořena dynamická síť metodou *layering*. Metodu *layering* lze aplikovat pouze na síť skládající se z šestihranů, nebo klínových prvků ve 3D anebo z čtyřúhelníkových prvků v případě 2D sítí. *Layering* umožňuje postupnou deformaci, a vznik a zánik jednotlivých vrstev buněk přilehlých k pohybující se hranici tělesa. Vznik a zánik vrstev buněk je řízen na základě výšky přilehlé vrstvy oproti zadané ideální výšce. Vznik nových vrstev buněk se řídí dle

$$h_{max} > (1 + a_s)h_{ideal} \quad (4.3)$$

a zánik vrstev buněk dle

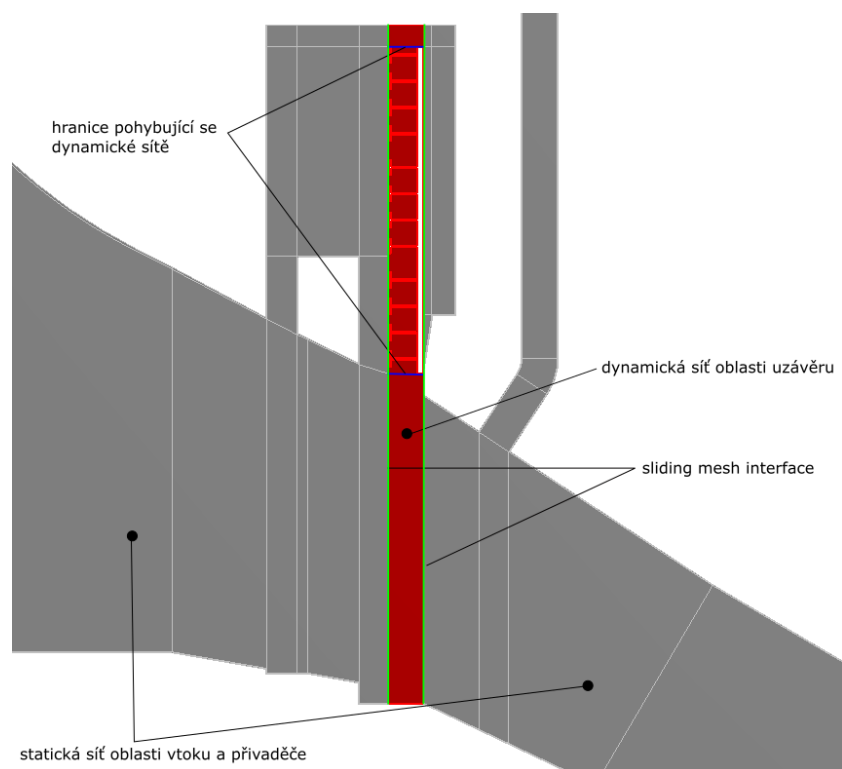
$$h_{min} < a_c h_{ideal}, \quad (4.4)$$

kde h_{min} a h_{max} jsou minimální a maximální povolené výšky buňky, a_c a a_s jsou faktory kolapsu a dělení buněk a h_{ideal} je ideální velikost výšky buňky. K rozdělení buněk a vzniku nové vrstvy dochází v případě, pokud velikost výšky deformované přilehlé vrstvy j překročí povolenou hodnotu h_{max} , a ke kolapsu a sloučení buněk, pokud výška deformované vrstvy j bude menší než h_{min} [16], viz obr. 17. V následujících simulacích byl nastaven faktor kolapsu 0,2 a faktor dělení 0,4 a ideální výška h_{ideal} odpovídá výšce okolních buněk, tedy 0,0235 m.



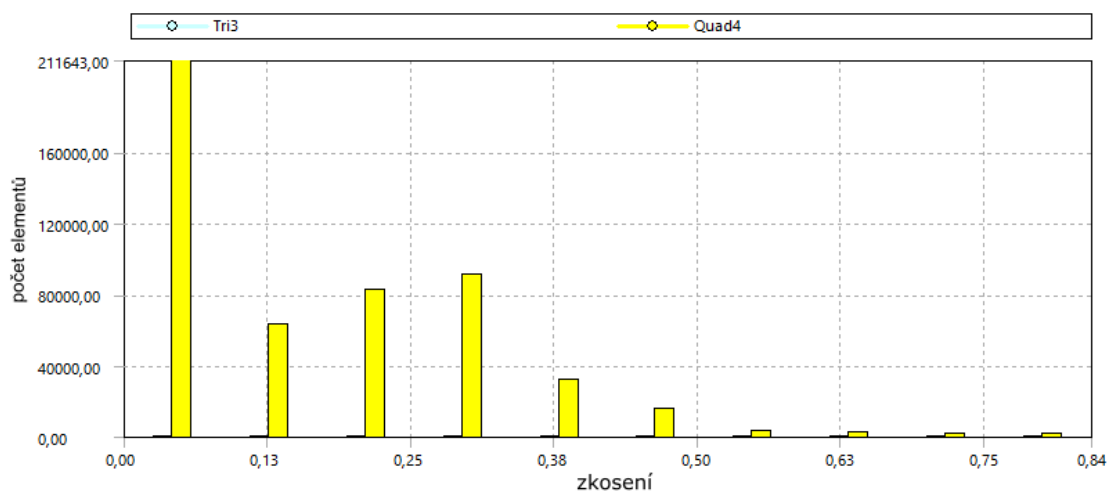
Obr. 17: Označení vrstev dynamické sítě při metodě *layering* (upraveno) [16]

V průběhu zavírání dochází k posunu dynamické oblasti sítě. Proto je nutné definovat rozhraní mezi nepohyblivými oblastmi vtoku a přiváděče s dynamickou oblastí uzávěru. Tato rozhraní jsou definována jako *sliding mesh interfaces*, které umožňují softwaru interpolovat veličiny při přechodu z jedné oblasti do druhé při nekonformnímu kontaktu sousedících buněk [8]. Rozhraní mezi dynamickou oblastí a statickými oblastmi sítě jsou zobrazeny na obr. 18.



Obr. 18: Detail dynamické sítě s rozhraním sliding mesh interface

Kvalita výpočetní sítě byla sledována na míře zkosení buněk výpočetní sítě a hodnotě y^+ . Největší míra zkosení dosahuje 0,84404 na 1530 elementech, celková střední míra zkosení je 0,15544, viz obr. 19.



Obr. 19: Zkosení elementů výpočetní sítě

Hodnota y^+ popisuje kvalitu sítě v mezní vrstvě. Dle hodnot y^+ lze určit, zda výpočetní síť odpovídá kvalitou zvolenému modelu turbulence a stěnovým funkcím. Ve výpočtu byl zvolen dvourovnicový model turbulence *RANS $k-\epsilon$* se stěnovou funkcí *Scalable*. Pro zvolený model turbulence jsou doporučené hodnoty y^+ rovny intervalu od 11,126 až do 120 [14]. Z důvodu pohybu dynamické sítě byly hodnoty y^+ sledovány pro různá relativní uzavření toku pro oba způsoby zavírání, viz tabulka 1 níže.

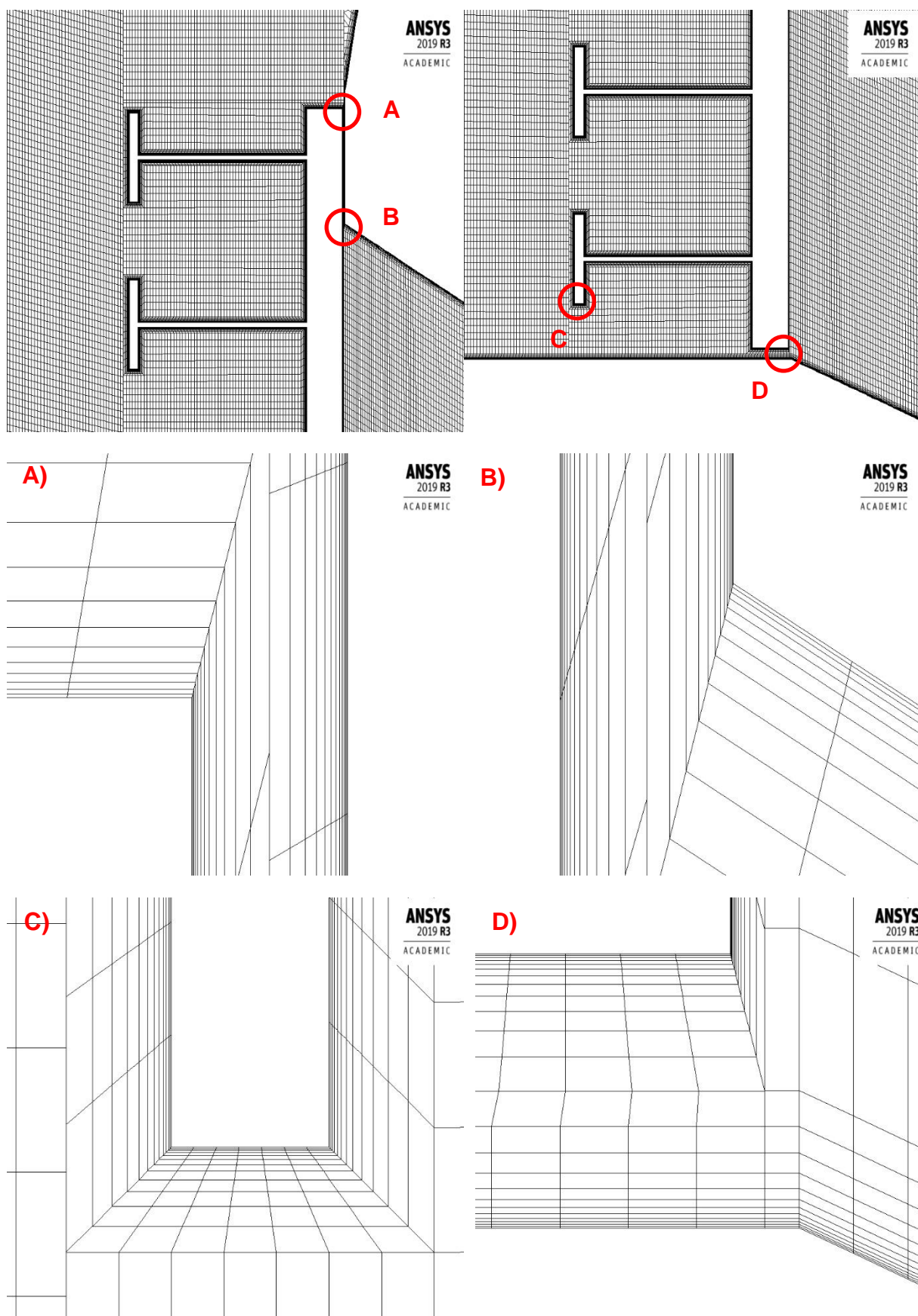
Tabulka 1: maximální hodnoty y^+

Simulace s konstantní rychlostí zavírání			Simulace pádu uzávěru		
Relativní uzavření	y^+ max	Oblast max. hodnoty y^+	Relativní uzavření	y^+ max	Oblast max. hodnoty y^+
0 %	36,5	vtokový portál	0 %	36,5	vtokový portál
30 %	46,0	sedlo tabulového uzávěru	27,7 %	41,5	spodní I profil uzávěru
50 %	72,6	sedlo tabulového uzávěru	54,5 %	56,3	spodní I profil uzávěru
75 %	110	sedlo tabulového uzávěru	83,8 %	83,5	spodní I profil uzávěru
99,6 %	229	mezera mezi uzávěrem a šachtou hradidla	99,4 %	834	sedlo tabulového uzávěru

Z tabulky 1 patrné, že kvalita sítě v mezní vrstvě je dostačující až do blízkosti dovření uzávěru. Růst hodnoty y^+ v průběhu simulace hrazení toku nastává výrazným nárůstem rychlosti proudění ve zmenšujícím se kanálu šachty. Hodnoty y^+ dosahují maxima v oblasti sedla uzávěru a spodního I profilu uzávěru. V případě hrazení toku konstantní rychlostí největší hodnota y^+ byla zjištěna v mezeře mezi stěnou šachty hradidel a tabulovým uzávěrem. Detaily sítě mezní vrstvy v oblastech mezi stěnou hradidlové šachty a tabulovým uzávěrem (detail A, B), spodního I profilu uzávěru (detail C) a oblasti sedla uzávěru (detail D) jsou zobrazeny v obr. 20 níže.

Z důvodu omezení počtu buněk výpočetní sítě studentskou licencí Ansys, nebylo možné dále síť v mezní vrstvě rozumně upravovat při zachování současné celkové kvality elementů, proto síť nebyla dále upravována a v této podobě byla použita v následujících simulacích. Pro správné podchycení proudění v mezní vrstvě a jevů v blízkosti dovření uzávěru je nutné výpočetní síť upravit.

Také v blízkosti dovření nastává problém velkého gradientu rychlostí a velké velikosti rychlosti proudění přes malý počet buněk výpočetní sítě. Problém malého počtu buněk v blízkosti dovření u těchto dynamických úloh nelze zcela odstranit.



Obr. 20: Detaily sítě mezní vrstvy při relativním zavření 99,4 %

4.4 Nastavení výpočtu a okrajových podmínek

Následující výpočet byl proveden v softwaru AnsysFluent 2019R3 a ke kompilaci uživatelských funkcí byl využit software Microsoft Visual Studio 2019.

4.4.1 Fyzikální vlastnosti pracovních médií

Na počátku simulace hrazení vtoku tabulovým uzávěrem je celá doména modelu zaplněna vodou včetně zavzdušňovacího potrubí. Během zavírání uzávěru bude docházet k poklesu tlaku za uzávěrem a tím k nasávání vzduchu v zavzdušňovacím potrubí. Vlivem tohoto jevu je nutné úlohu řešit jako dvoufázovou, kde participující fáze jsou voda a vzduch.

Fyzikální vlastnosti pracovních médií vody a vzduchu jsou uvedeny níže v tabulce 2. Hodnoty byly určeny pro zvolenou teplotu médií 4°C, která reflektuje nejméně příznivý stav při zavírání uzávěru.

Tabulka 2: fyzikální vlastnosti pracovních médií [17]

Fáze	Hustota [kg/m ³]	Dynamická viskozita [Pa·s]	Povrchové napětí mezi fázemi [N/m]
Voda	999,95	1,5705e-3	0,075
Vzduch	1,273	1,803e-5	0,075

4.4.2 Okrajové podmínky

Na obr. 21 níže jsou zobrazena umístění okrajových podmínek vstupu a výstupu vody a vzduchu z domény modelu. Vstup vody do domény se nachází na hladině horní nádrže. Okrajová podmínka byla zvolena tlaková o velikosti relativního tlaku 0 Pa s mírou turbulence 5 % a poměrem turbulentní viskozity 10 na vstupu do domény.

Vstup vzduchu do domény se nachází na hladině zavzdušňovacího potrubí. Aby bylo zabráněno nasávání vzduchu do systému při inicializaci a počátku stacionární simulace, byla použita okrajová podmínka s velikostí rychlosti proudění vzduchu do systému 0 m/s. Následně po konvergenci stacionární simulace byla změněna na tlakovou o velikosti relativního tlaku vzduchu 0 Pa, mírou turbulence 5 % a poměrem turbulentní viskozity 10 na vstupu do domény. Tlaková podmínka byla použita v následujících transientních simulacích hrazení toku.

Výstup vody a vzduchu z domény se nachází na konci potrubí přivaděče. V místě výstupu domény nejsou známy průběhy tlaku a průtoku či dalších veličin, které by bylo možné použít v okrajové podmínce. Hodnoty veličin na výstupu navíc závisí na poloze uzávěru a množství přisátého vzduchu. Z toho důvodu byla okrajová podmínka na výstupu zvolena tlaková v kombinaci s vlivem odporu proti proudění porézní zóny. Relativní tlak na výstupu byl zvolen 0 Pa s mírou turbulence 5 % a poměrem turbulentní viskozity 10. Porézní zóna představuje tlakové ztráty, které vznikají v následujícím potrubí, na turbíně, savce, výtoku a v dalších vřazených odporech.

Porézní zóna je umístěna na konci přivaděče, je dlouhá 2,5 m a její parametry byly nastaveny tak, aby při plně otevřeném uzávěru byl objemový průtok roven skutečnému maximálnímu průtoku přivaděče ve vodní elektrárně Slapy, tj. 200 m³/s. V porézní zóně je pro zjednodušení uvažováno pouze laminární proudění. Tlaková ztráta v laminární porézní zóně se řídí dle Darcyho zákona

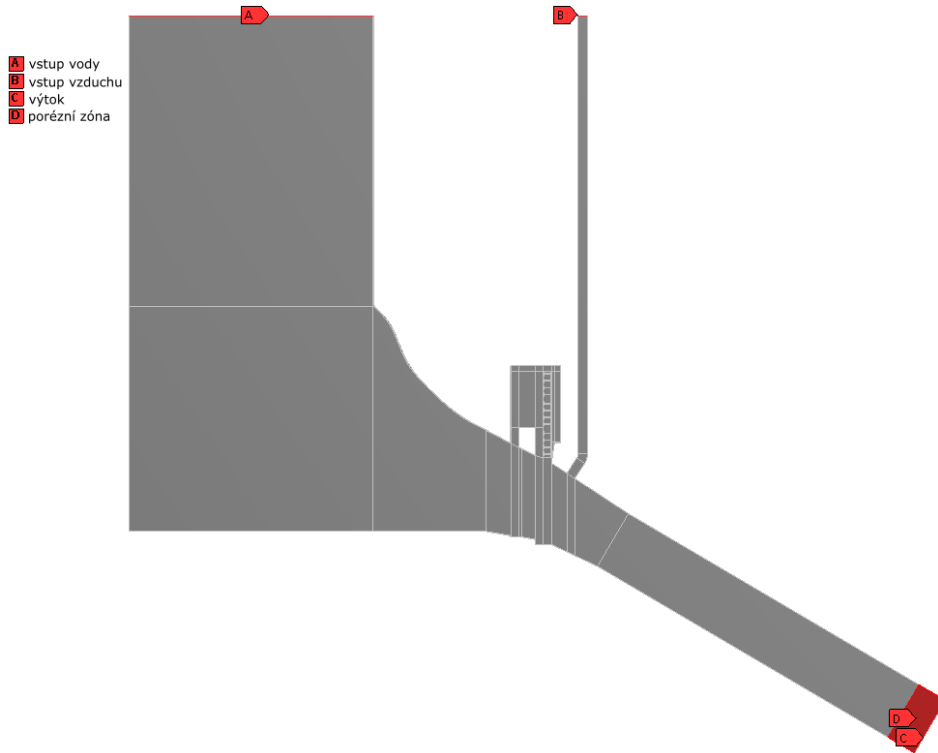
$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{ij}} v_j \Delta n_i, \quad (4.5)$$

kde Δp_i je tlaková ztráta ve směru i , μ je dynamická viskozita média, α_{ij} je matice propustnosti média, v_j je rychlost proudění média ve směru j a Δn_i představuje rozměr porézní zóny ve směru i [16]. Hodnoty matice viskózního odporu proti proudění K_{ij} jsou rovny převráceným hodnotám matice propustnosti. Po úpravě tlaková ztráta v porézní zóně odpovídá

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^3 \mu K_{ij} v_j \Delta n_i. \quad (4.6)$$

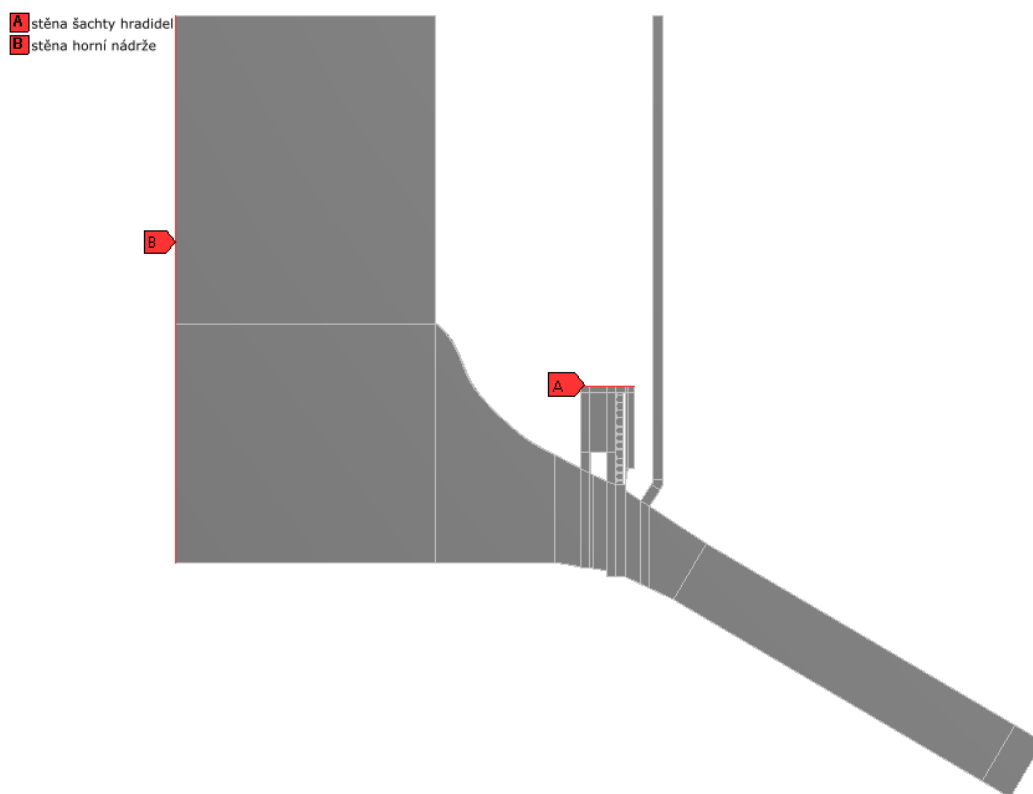
Hodnoty matice viskózního odporu K_{ij} porézní zóny byly nastaveny tak, aby při stacionárním výpočtu s plně otevřeným uzávěrem byl objemový průtok na výstupu z domény roven $200 \text{ m}^3/\text{s}$ při použití výše zmíněných okrajových podmínek. Tomuto stavu odpovídají hodnoty

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} 1,5 \cdot 10^7 & 0 \\ 0 & 1,5 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \text{m}^{-2}.$$



Obr. 21: Okrajové podmínky na vstupu a výstupu z domény modelu

Na stěnách domény je použita podmínka ulpívání proudícího média na povrchu stěny, tzv. *No slip wall*. Stěny domény, které vznikly zjednodušením modelu a fyzicky stěnami nejsou, tj. vertikální stěna horní nádrže a horní horizontální stěna šachty hradidel, viz obr. 22, jsou popsány podmínkou, kde k ulpívání proudícího média nedochází, tzv. *Zero shear slip wall*. Stěny domény jsou modelované jako hladké s nulovou drsností. Na stěně uzávěru a její blízké síti je předepsaný pohyb konstantní rychlostí při řízeném zavírání a pohyb pomocí uživatelské funkce v případě simulace pádu uzávěru.



Obr. 22: Stěny domény vzniklé zjednodušením modelu

4.4.3 Metoda 6DOF a uživatelská funkce UDF

Pohyb tabulového uzávěru při jeho pádu do plného průtoku byl realizován pomocí metody 6DOF. Metoda 6DOF umožňuje pohyb tělesa až v šesti stupních volnosti. V simulaci pádu uzávěru byl pohyb omezen pouze na translační ve vertikální ose, tj. ve směru či protisměru zavírání. Simulace tedy nezachycuje mírné natáčení uzávěru a jeho možný pohyb ve vymezené vůli vedení vodících kol.

Pohyb uzávěru je řízen dle uživatelské funkce neboli UDF, která byla napsána v programovacím jazyce C. Funkce byla následně zkompileována pro použití v AnsysFluent. Funkce řídí pohyb uzávěru na základě sil působících na uzávěr. Funkce zohledňuje tíhu uzávěru, tlakové a viskózní síly vyvolané kapalinou, třecí sílu a setrvačnost pohybu uzávěru.

Pro předepsání pohybu pádu uzávěru bylo z nabídky dynamických maker AnsysFluent použito makro `DEFINE_SDOF_PROPERTIES`. Toto makro umožňuje přiřadit pohybujícím se objektům vlastnosti, jako jsou hmotnost, momenty a produkty setrvačnosti, nebo přiřadit zatížení vnějšími silami či vnějšími momenty. Makro také umožňuje omezit počet stupňů volnosti pohybu. Jediným nenulovým pohybem byl definován translační pohyb ve vertikální ose příkazem `prop[SDOF_ZERO_TRANS_Y] = FALSE`. K výpočtu vnějších sil tekutin byla sestavena smyčka `f_loop(f, t)`, ve které jsou počítány přírůstky tlakových a viskózních sil přes všechny plochy definovaného tělesa. Přírůstky tlakových sil jsou počítány vztahem $F_P(f, t) * A[i] * DEPTH$, kde $F_P(f, t)$ je makro pro výpočet tlaku působícího na plochu f definovaného tělesa vláknem t a $A[i] * DEPTH$ je velikost plochy uzávěru, kde $[i]$ udává směr působení síly. Viskózní síly jsou počítány makrem $-F_{STORAGE_R_N3V}(f, t, SV_WALL_SHEAR)[i] * DEPTH$, kde f definuje plochu tělesa t , SV_WALL_SHEAR povrchové napětí a $[i]$ udává směr působení síly. Index i je roven 0 v horizontálním směru a 1 ve vertikálním směru. Zatížení vnějšími silami ve vertikální

ose je definované příkazem *prop[SDOF_LOAD_F_Y]* a je rovno součtu vertikální síly a třecí síly. Třecí síla je dána vztahem (4.2). Gravitační zatížení je již zohledněno přiřazením hmotnosti tělesu příkazem *prop[SDOF_MASS]*. Funkce také byla použita k záznamu působících sil, polohy a rychlosti pádu uzávěru. Funkce UDF je vložena v příloze B. [18]

4.4.4 Nastavení řešiče

V následujících simulacích hrazení toku tabulovým uzávěrem byl použit dvourovnicový model turbulence RANS *Realizable k- ϵ* se stěnovou funkcí *Scalable*. Pro dvoufázové proudění byl využit model *Volume of fluid*, ve kterém byly definovány dvě eulerovské fáze participujících médií, tj. vody a vzduchu. V úloze je uvažován vliv gravitace. Pro výpočet sil od proudících tekutin, které působí na plochu uzávěru, bylo nutné uvažovat rozměr šířky dvourozměrného modelu. Šířka modelu byla zvolena 4,5 m – jedná se o kompromis mezi skutečnými rozměry šířky průtočného kanálu hradidlové šachty a šířky uzávěru. Rozměr šířky průtočného kanálu na díle VE Slapy je 4 m a rozměr šířky tabulového uzávěru včetně vodících kol je 5,32 m.

Pro simulaci hrazení toku tabulovým uzávěrem s konstantní rychlostí byla uvažována rychlost zavírání 0,2 m/s, která přibližně odpovídá rychlosti zavírání uzávěru na VE Slapy. Časový krok této simulace se pohyboval v rozmezí 1e-03 s až 5e-04 s. Pro simulaci pádu uzávěru byla využita metoda 6DOF a napsána funkce UDF, podle které je pohyb uzávěru řízen. Časový krok této simulace se pohyboval v rozmezí 2e-04 s až 5e-05 s. Podrobné nastavení řešiče při stacionárním i transientním výpočtu je v tabulce v příloze C.

5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULACÍ HRAZENÍ TOKU

5.1 Výsledky simulace hrazení toku konstantní rychlostí 0,2 m/s

Doba uzavíracího procesu toku tabulovým uzávěrem, který je zavírán konstantní rychlostí 0,2 m/s je dána vzdáleností spodní hrany uzávěru v horní poloze od sedla uzávěru. Vzdálenost je v modelu rovna 7,12 m, doba hrazení toku tedy odpovídá 35,6 s. Simulace proběhla do 99,64 % relativního uzavření, což odpovídá otevření uzávěru 25,6 mm a době simulace 35,47 s.

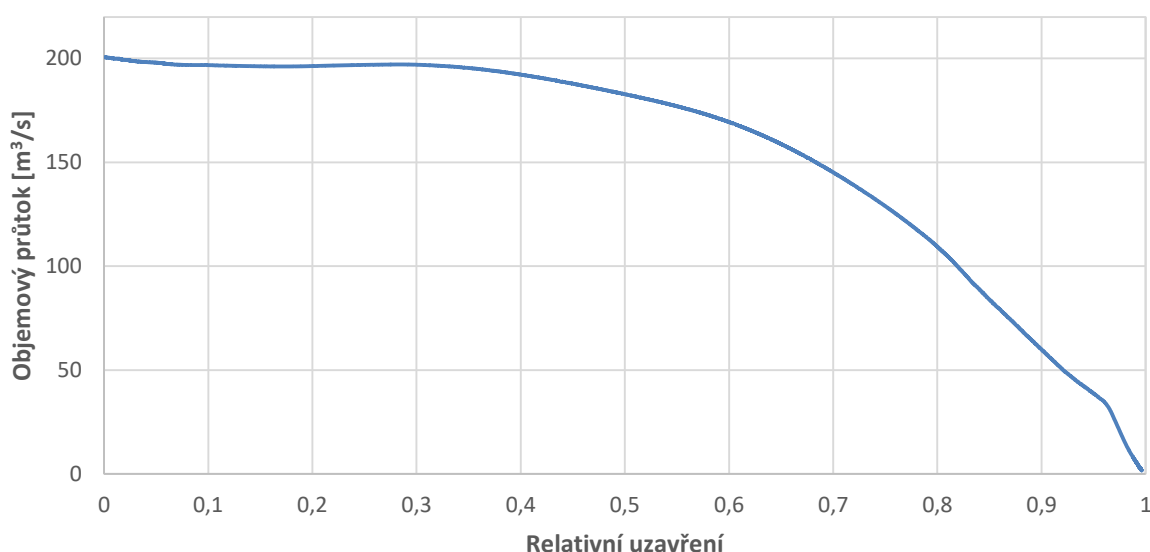
5.1.1 Popis simulace hrazení toku

Uzavěr pohybující se konstantní rychlostí se v horní poloze nachází 0,47 m nad průtočným kanálem šachty. V čase simulace 2,35 s, při relativním uzavření 6,6 %, spodní hrana uzávěru dosáhla průtočného kanálu. Během dalšího zavírání docházelo k nárůstu tlaku před uzávěrem a poklesu tlaku za uzávěrem. Pokles tlaku za uzávěrem měl za následek postupné přisávání vzduchu v zavzdušňovacím potrubí. Zhruba při 81 % relativního zavření v době simulace 28,6 s přisátý vzduch dosáhl vstupu do potrubí přivaděče a při dalším zavírání již došlo k zavzdušnění oblasti přivaděče a zadní stěny tabulového uzávěru. Zavzdušnění zadní stěny uzávěru má výrazný vliv na dosavadní průběh sil působících na tabulový uzávěr. Na spodním I profilu uzávěru docházelo k odtržení proudu vody. Rychlost proudění v oblasti pod uzávěrem narůstala se zmenšující se průtočnou plochou kanálu až na 160 m/s, které dosáhla při relativním zavření 99,64 %.

Kontury statického tlaku, rychlosti proudění a rozložení fází vody a vzduchu jsou vloženy v příloze D a animace změny tlaku, rychlosti a rozložení fází jsou vloženy v elektronické příloze.

5.1.2 Průběh objemového průtoku

Objemový průtok v průběhu simulace byl sledován v průtočném kanálu šachty ve vertikální linii od spodní hrany tabulového uzávěru po sedlo uzávěru. Zjištěný průtok tedy odpovídá pouze průtoku pod uzávěrem a přisátý vzduch a voda ze zavzdušňovacího potrubí na sledovaný průběh nemají vliv. Výrazné změny průtoku nastaly až po 30 % relativního zavření. Objemový průtok klesal z počátečních hodnoty 200 m³/s až na hodnotu 1,83 m³/s, která nastala na konci simulace při relativním uzavření 99,64 % v čase 35,47 s, viz obr. 23.

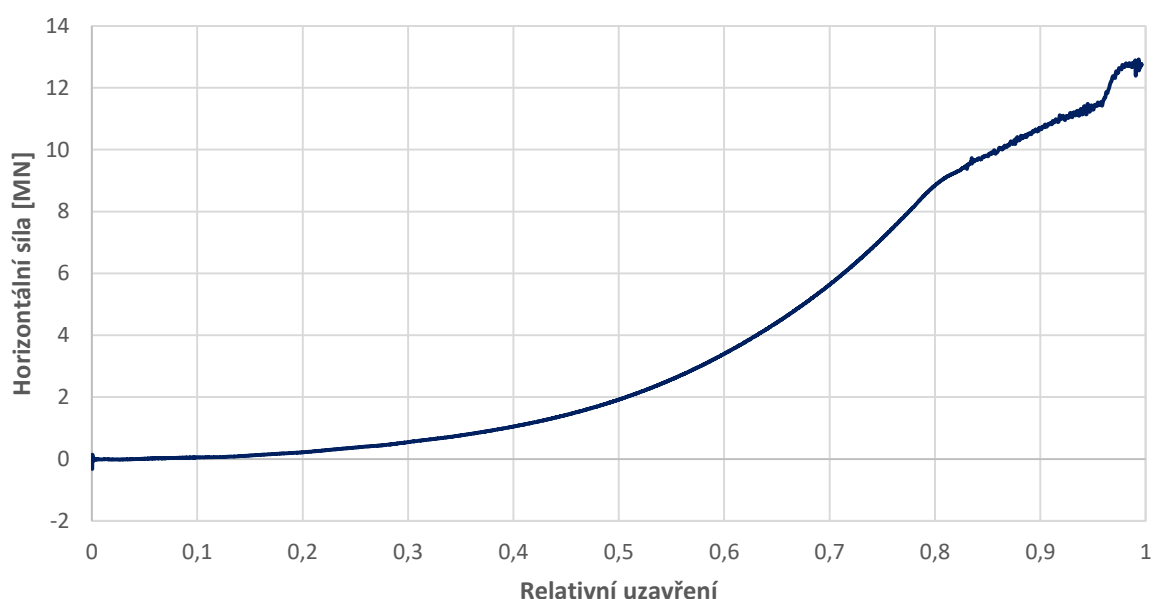


Obr. 23: Průběh objemového průtoku na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s

5.1.3 Průběh horizontální síly

Horizontální síla byla počítána jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na stěny tabulového uzávěru. Velikost síly rostla s relativním uzavřením toku, tedy se zvětšujícím se zanořením uzávěru do proudu vody. V závislosti průběhu horizontální síly na relativním uzavření v obr. 24 je zachycen vliv zavzdušnění přivaděče a zadní stěny tabulového uzávěru. Zavzdušnění nastalo při 81 % relativního uzavření, a tím došlo k výraznému zmírnění dosavadního trendu růstu síly. Zmírnění růstu síly bylo způsobené vyrovnáním podtlaku v oblasti za uzávěrem přísátým vzduchem. V blízkosti dovření při 96 % relativního uzavření došlo k prudkému nárůstu velikosti horizontální síly až na maximum 12,91 MN, které nastalo při relativním uzavření 99,32 % a čase 35,36 s.

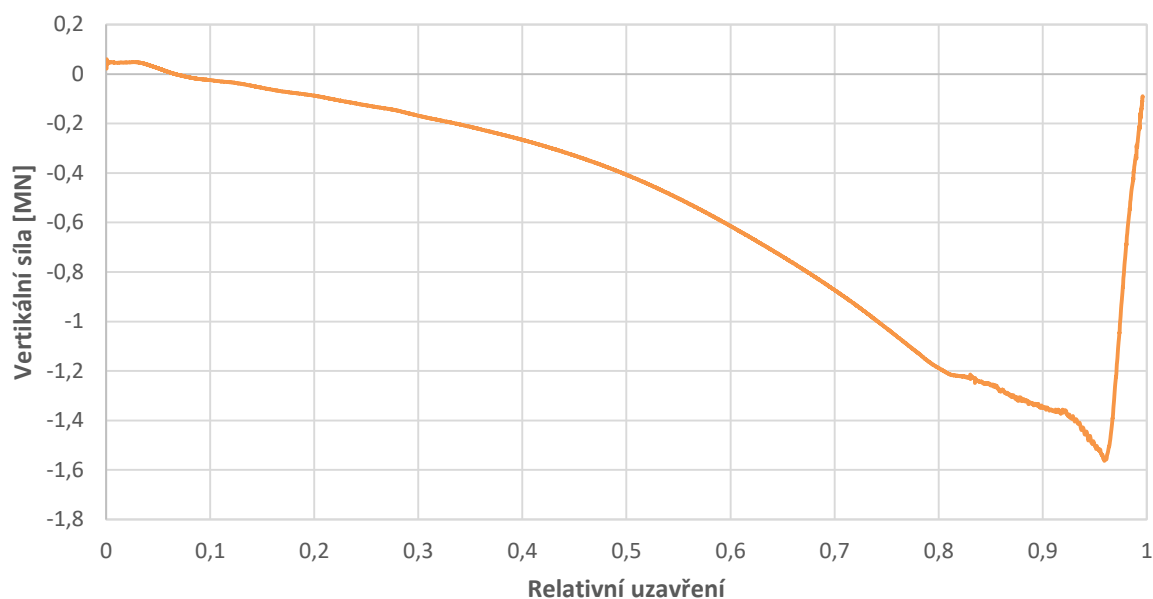
Průběh třecí síly odpovídá průběhu síly horizontální. Velikost třecí síly je počítána dle rovnice (4.2). Protože se jedná o simulaci s neměnnou orientací pohybu uzávěru, jsou hodnoty třecí síly kladné a síla působila proti směru zavírání. Maximální hodnota třecí síly dosáhla 129,1 kN při relativním uzavření 99,32 %.



Obr. 24: Průběh horizontální síly na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s

5.1.4 Průběh vertikální síly

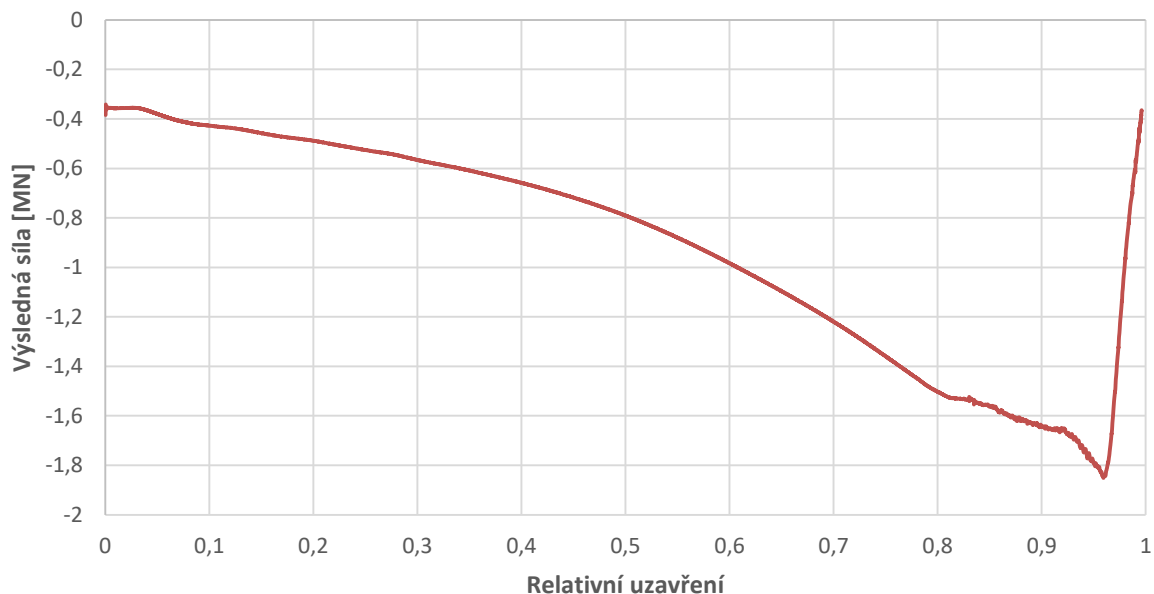
Vertikální síla byla počítána jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na stěny tabulového uzávěru. Závislost vertikální síly na relativním uzavření je zobrazena v obr. 25. Hodnoty vertikální síly jsou kladné do 6,6 % relativního uzavření, což odpovídalo pohybu uzávěru v šachtě hradidel nad průtočným kanálem toku. Po zanoření uzávěru do průtočného kanálu, vertikální síla klesala do záporných hodnot. Při 81 % relativního uzavření byl zachycen vliv zavzdušnění kanálu a zmírnění trendu poklesu velikosti síly. V blízkosti dovření dosáhla vertikální síla minima -1,56 MN při 96,1 % relativního uzavření v čase 34,1 s. Při dalším zavírání došlo ke změně trendu průběhu vertikální síly a síla prudce rostla až na hodnotu -0,9 MN, která nastala na konci simulace.



Obr. 25: Průběh vertikální síly na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s

5.1.5 Průběh výslednice sil v ose zavírání

Výslednice sil působících na uzávěr v ose zavírání byla dána součtem tíhové síly uzávěru, vertikální síly od proudících tekutin a třecí síly vyvolané v těsnění a ve vodících kolech, viz rovnice (4.1). Závislost výsledné síly na relativním uzavření je zobrazena v obr. 26. Síla v průběhu hrazení toku byla po celou dobu simulace záporná a klesla až na hodnotu minima -1,85 MN, které nastalo při relativním uzavření 96,1 % v čase simulace 34,15 s. Při dalším zavírání se trend průběhu výsledné síly změnil a síla prudce rostla až do konce simulace. Ovšem velikost síly nedosáhla kladných hodnot, a tím nedošlo ke změně její orientace. Síla na konci simulace dosáhla hodnoty -0,377 MN. Ze zjištěného průběhu je tedy patrné, že k zastavení či otevírání uzávěru vlivem působících sil docházet nebude.



Obr. 26: Průběh výslednice sil v ose zavírání na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s

5.2 Výsledky simulace hrazení toku pádem tabulového uzávěru

Simulace hrazení toku pádem tabulového uzávěru proběhla do 99,42 % relativního uzavření, které odpovídá otevření uzávěru 41,4 mm. Doba uzavíracího procesu simulace trvala 1,529 s.

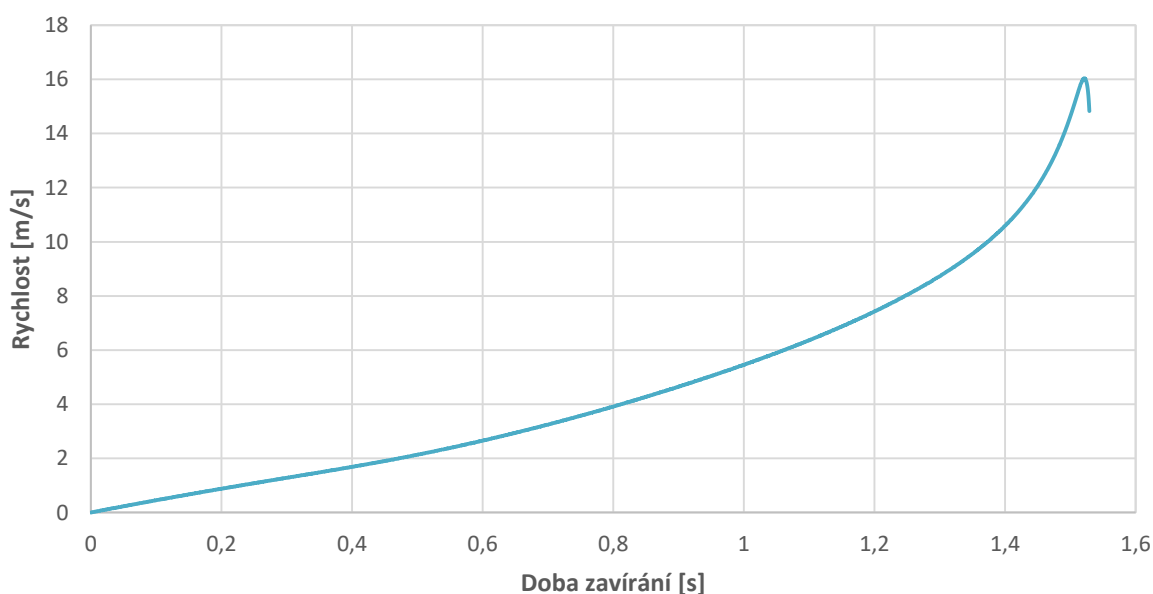
5.2.1 Popis simulace pádu uzávěru

Stejně jako v předchozí simulaci se uzávěr nacházel ve výchozí poloze v šachtě hradidel. Pohyb uzávěru byl iniciován jeho tíhou a rychlost pohybu klesala až do blízkého dovření. Při hrazení toku docházelo k nárůstu tlaku před uzávěrem a poklesu tlaku za uzávěrem. Oproti předchozí simulaci byl nárůst tlaků náhlý a násobně větší. To bylo způsobené zejména velmi krátkou dobou uzavíracího procesu. Vlivem této náhlé změny také nestihlo dojít k zavzdušnění přivaděče a vyrovnání podtlaku za uzávěrem. Rychlost proudění v oblasti pod spodní hranou uzávěru narostla až na hodnotu 350 m/s, která nastala na konci simulace v blízkosti dovření uzávěru. Tato velikost rychlosti nemusí být věrohodná, protože může být ovlivněna kvalitou výpočetní sítě. Výpočetní síť v blízkosti dovření při simulaci hrazení pádem uzávěru v oblasti sedla neodpovídala doporučeným hodnotám y^+ a také v blízkosti dovření nastává problém velkého gradientu rychlostí a velké velikosti rychlosti proudění přes malý počet buněk výpočetní sítě, viz podkapitola 4.3. Z uvedených důvodů je nutné předpokládat, že výsledky v blízkosti dovření uzávěru mohou být ovlivněny kvalitou a možnostmi sítě.

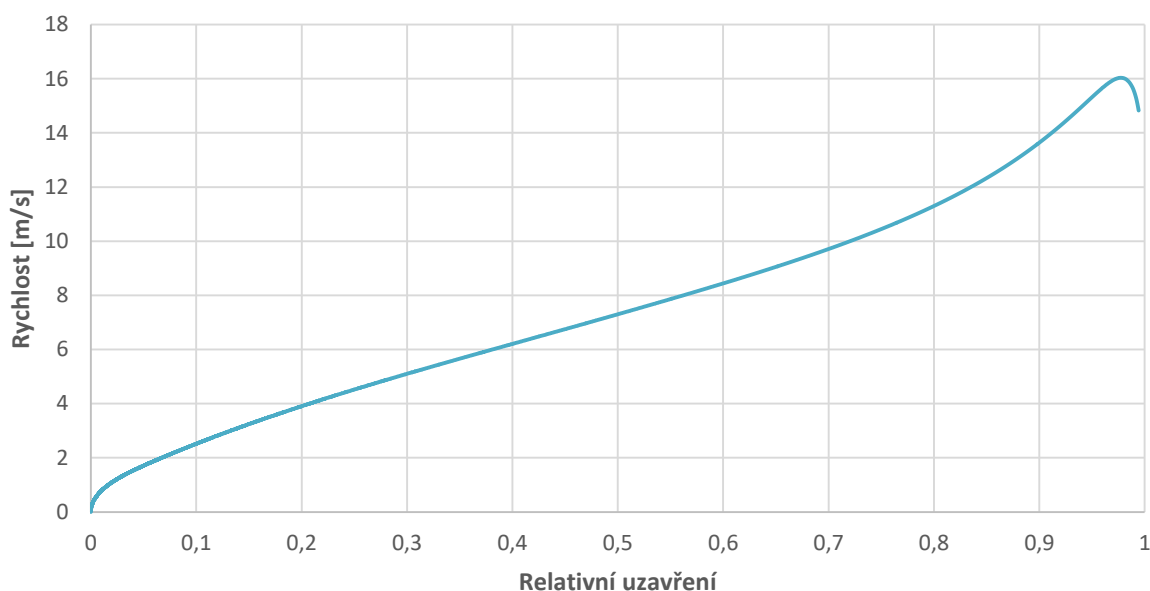
Kontury statického tlaku, rychlosti proudění a rozložení fází vody a vzduchu jsou vloženy v příloze E. Animace změny tlaku, rychlosti a rozložení fází jsou vloženy v elektronické příloze.

5.2.2 Průběh rychlosti pádu uzávěru

Zjištěné průběhy rychlosti uzávěru ve směru zavírání v době zavírání a na relativním uzavření jsou zobrazeny v obr. 27 a 28 níže. Pád uzávěru byl iniciován jeho vlastní tíhou. Uzávěr padal z horní polohy s nulovou počáteční rychlostí a v průběhu simulace byl urychlován působícími silami až do času 1,52 s při 97,8 % relativního uzavření. Rychlost uzávěru dosáhla 16 m/s. Při dalším zavírání docházelo ke zpomalování uzávěru až do konce simulace na hodnotu 14,8 m/s. Zpomalování nastalo v blízkosti dovření vlivem změny orientace výslednice sil působících na uzávěr. V simulaci nedošlo k zastavení nebo změně orientace pohybu uzávěru.



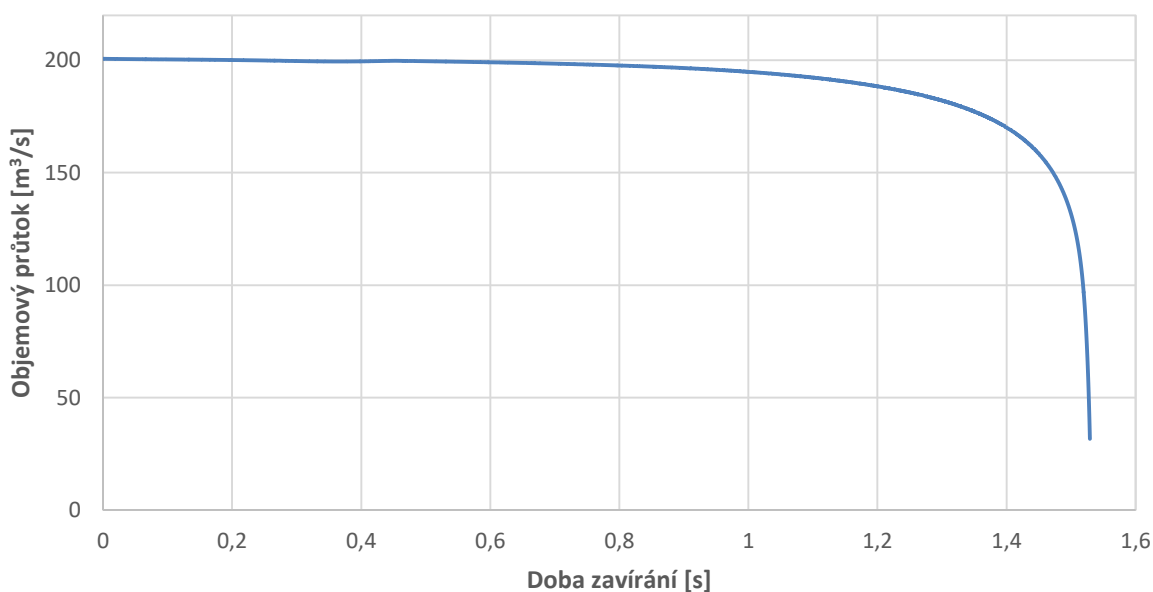
Obr. 27: Průběh rychlosti pohybu uzávěru v době zavírání při simulaci pádu uzávěru



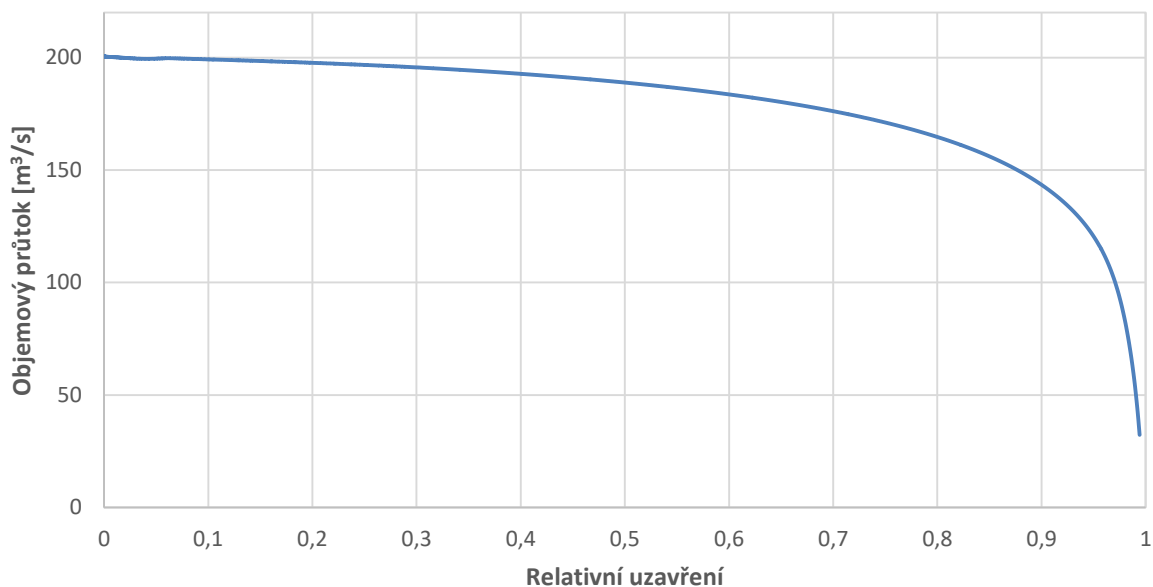
Obr. 28: Průběh rychlosti pohybu uzávěru na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru

5.2.3 Průběh objemového průtoku při pádu uzávěru

Zjištěné průběhy objemového průtoku v době zavírání a na relativním uzavření jsou zobrazeny v obr. 29 a 30 níže. Objemový průtok byl sledován ve stejném místě jako v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí pohybu. Jedná se tedy pouze o průtok vody pod uzávěrem. Průběh objemového průtoku výrazně závisí na rychlosti pohybu uzávěru. Na počátku simulace, kdy se uzávěr pohyboval malými rychlostmi, docházelo k nepatrným změnám průtoku vlivem malého relativního uzavření a malým změnám relativního uzavření. S narůstající rychlostí uzávěru docházelo k prudkému poklesu průtoku až na hodnotu 31,66 m³/s, která nastala na konci simulace při relativním uzavření 99,42 %. Protože tato hodnota průtoku pro tak malé otevření je vysoká a v blízkosti dovození výpočetní sítě neodpovídala kvalitou, jak bylo zmíněno výše v podkapitole 5.2.1 a v podkapitole 4.3, je nutné předpokládat, že výsledky mohly být ovlivněny kvalitou a možnostmi výpočetní sítě.



Obr. 29: Průběh objemového průtoku v době zavírání při simulaci pádu uzávěru

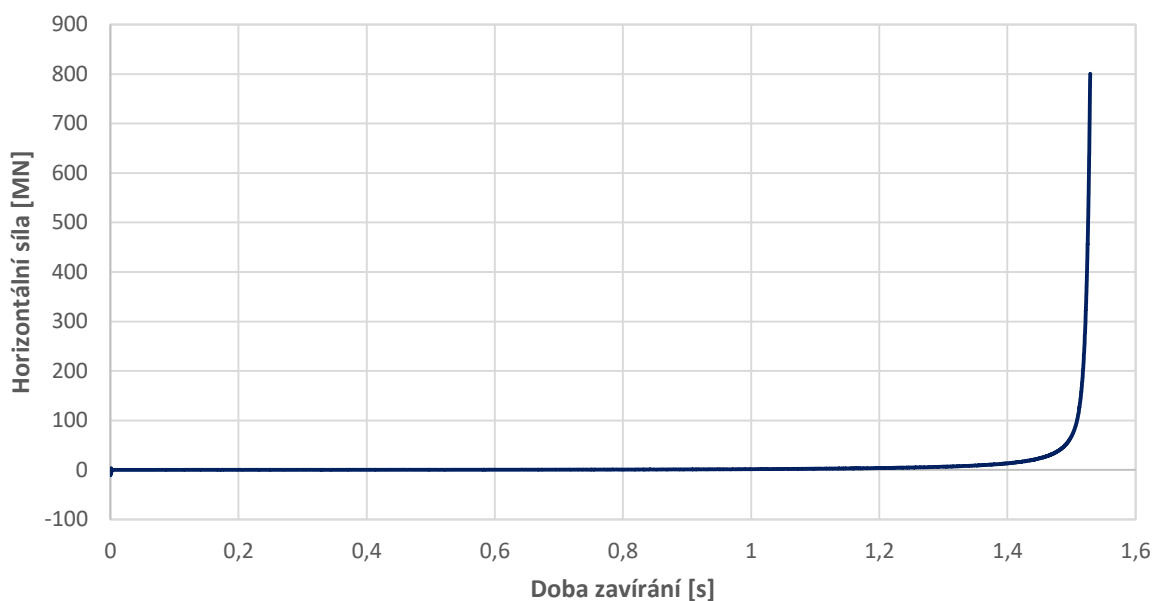


Obr. 30: Průběh objemového průtoku na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru

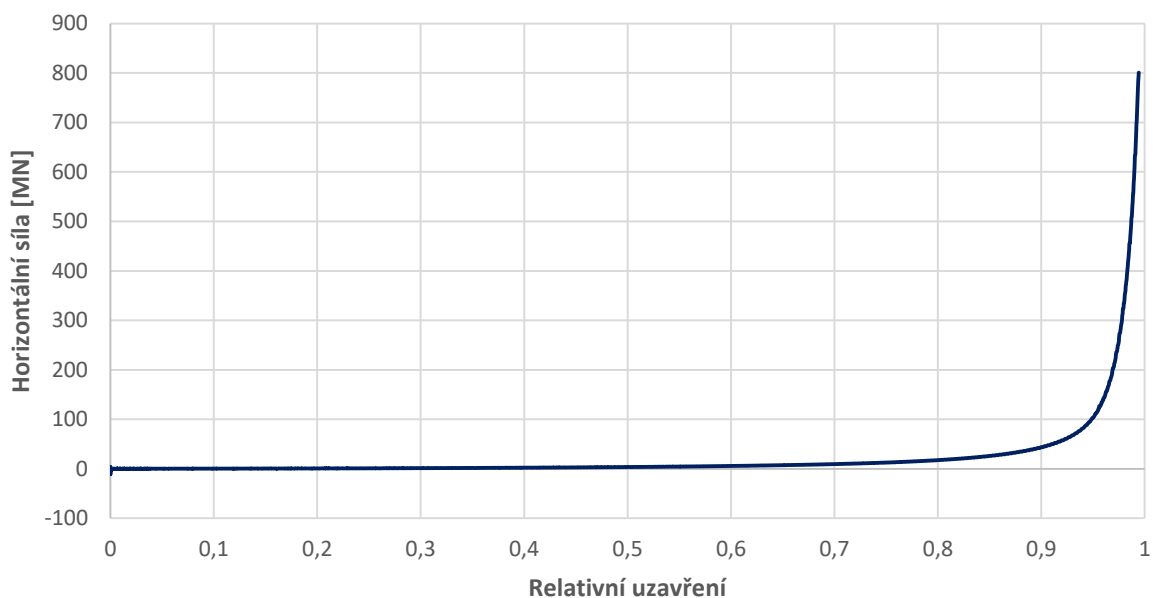
5.2.4 Průběh horizontální síly při pádu uzávěru

Zjištěné průběhy horizontální síly působící na uzávěr v době zavírání a při relativním uzavření jsou zobrazeny v obr. 31 a 32 níže. Horizontální síla byla počítána jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na stěny tabulového uzávěru. Velikost síla rostla s relativním uzavřením toku z nulových hodnot až na hodnotu 800,7 MN, které bylo dosaženo na konci simulace. Největší vliv na růst horizontální síly měl vznik velmi velké difference tlaků před a za uzávěrem. Tato difference byla způsobena náhlým zahrazením toku během velmi krátké doby. Největší nárůst horizontální síly nastal v blízkosti dovření uzávěru. Ovšem v blízkosti dovření, respektive pro velmi malé otevření uzávěru, byla kvalita výpočetní sítě nedostatečná, a proto je nutné předpokládat, že velikost horizontální síly v blízkosti dovření mohla být ovlivněna kvalitou výpočetní sítě, jak bylo zmíněno výše v podkapitole 5.2.1 a v podkapitole 4.3.

Průběh třecí síly odpovídá průběhu síly horizontální. Velikost třecí síly byla počítána dle rovnice (4.2). Hodnoty třecí síly byly v celém průběhu simulace kladné, protože nedošlo ke změně orientace pohybu uzávěru a síla tak působila proti směru zavírání. Maximální hodnota třecí síly dosáhla 8 MN při relativním uzavření 99,42 %.



Obr. 31: Průběh horizontální síly v době zavírání při simulaci pádu uzávěru

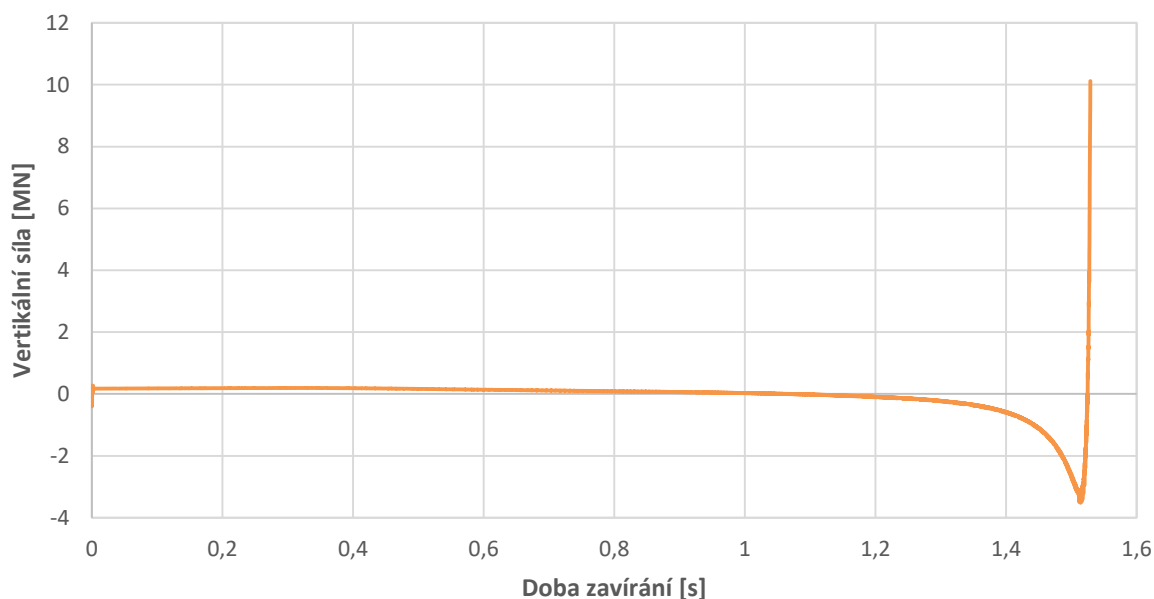


Obr. 32: Průběh horizontální síly na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru

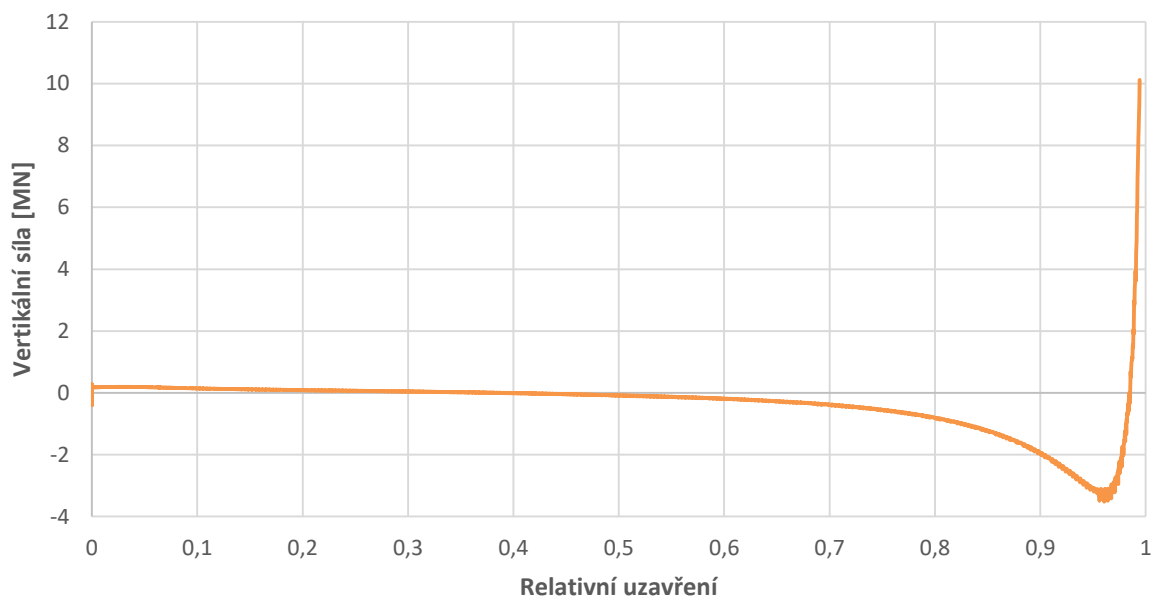
5.2.5 Průběh vertikální síly při pádu uzávěru

Zjištěné průběhy vertikální síly působící na uzávěr v době zavírání a při relativním uzavření jsou zobrazeny v obr. 33 a 34 níže. Síla byla počítána jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na stěny tabulového uzávěru. Síla byla kladná do 38 % relativního uzavření, které nastalo v době 1,06 s, a tím přispívala k brzdění pádu uzávěru. Při dalším zavírání až do 98,4 % relativního uzavření, které nastalo v čase 1,52 s, byla vertikální síla záporná a přispívala k zrychlování pádu uzávěru. Vertikální síla dosáhla minima -3,52 MN při relativním uzavření 96,1 % v čase simulace 1,51 s. Při dalším zavírání došlo k výraznému růstu tlaku v oblasti mezi spodním I profilem uzávěru a sedlem, viz průběh statických tlaků v příloze E. Tento růst tlaku následně zapříčinil prudký růst vertikální síly až do kladných hodnot. Hodnota maxima

vertikální síly dosáhla 10,12 MN na konci simulace. Ovšem jak již bylo zmíněno výše v podkapitole 5.2.1 a v podkapitole 4.3, z důvodu kvality sítě v blízkosti dověření je nutné předpokládat, že velikost vertikální síly mohla být ovlivněna malým počtem buněk a špatnou kvalitou sítě mezní vrstvy.



Obr. 33: Průběh vertikální síly v době zavírání při simulaci pádu uzávěru

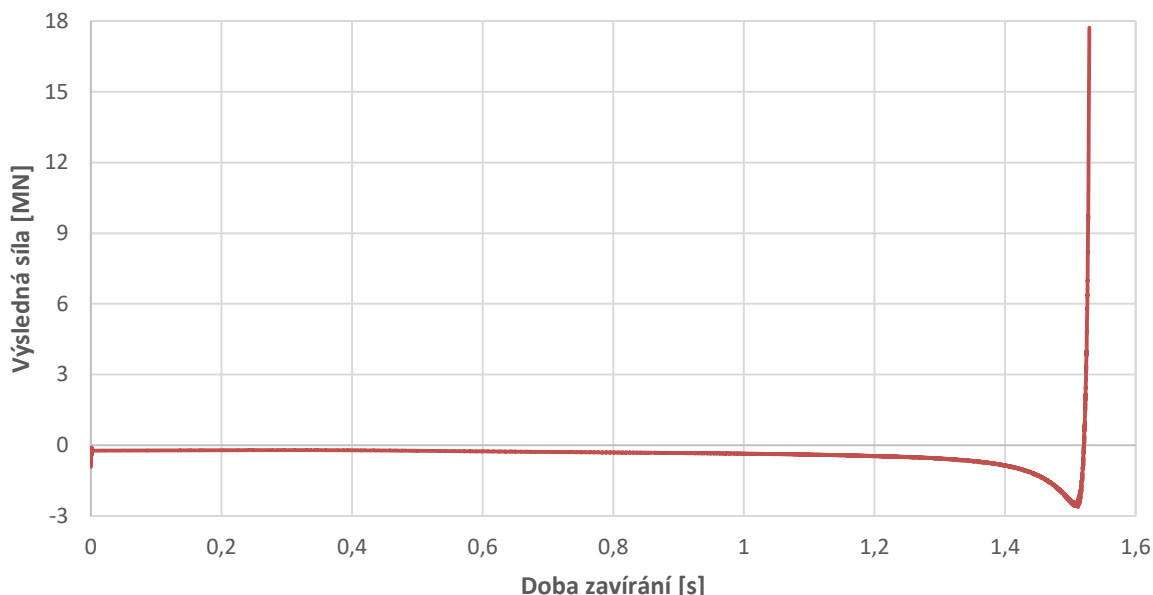


Obr. 34: Průběh vertikální síly na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru

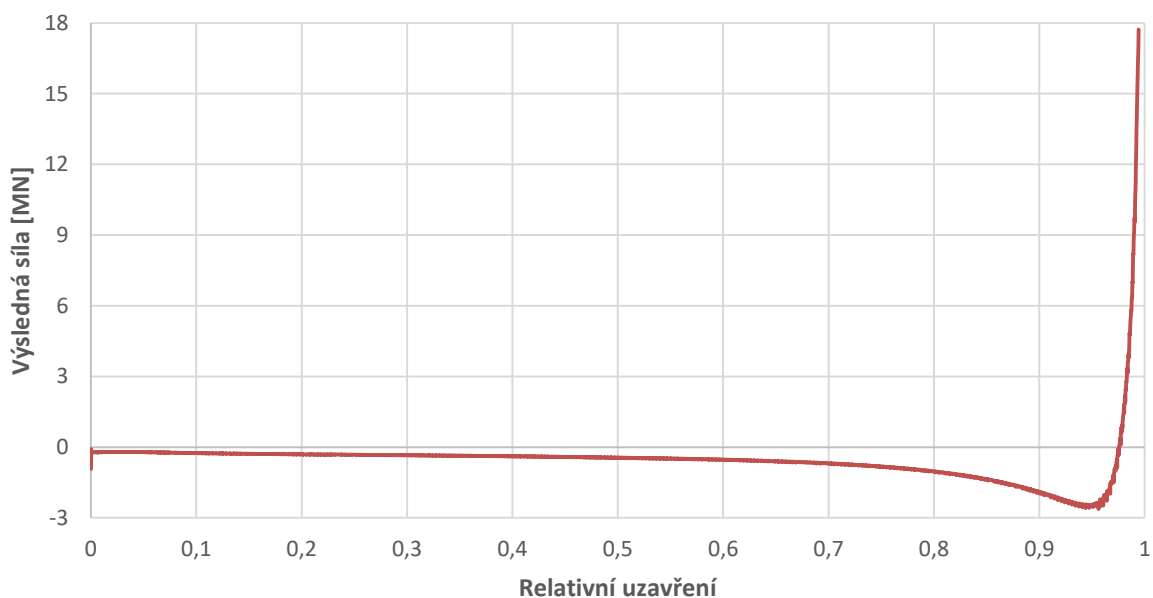
5.2.6 Průběh výslednice sil v ose zavírání při pádu uzávěru

Zjištěné průběhy výslednice sil v ose zavírání při pádu uzávěru jsou zobrazeny níže v obr. 35 a 36. Výslednice sil působících na uzávěr v ose zavírání byla dána součtem tíhové síly uzávěru, vertikální síly od proudících tekutin a třecí síly vyvolané v těsnění a ve vodících kolech, viz rovnice (4.1). Výsledná síla od počátku hrazení toku byla záporná a docházelo k urychlování

pádu tabulového uzávěru. Výsledná síla dosáhla minima -2,62 MN při relativním uzavření 95,6 % v čase simulace 1,51 s. Při dalším zavírání se trend průběhu i orientace výsledné síly prudce změnila a velikost výsledné síly rostla do kladných hodnot. Kladných hodnot bylo dosaženo při 97,8 % relativního uzavření v době 1,52 s. Tedy v těsné blízkosti dovření byl tabulový uzávěr působícími silami zpomalován. Hodnoty výsledné síly dosáhly maxima na konci simulace 17,72 MN. Ovšem z výše popsaných důvodů v podkapitole 5.2.1 a v podkapitole 4.3, je nutné předpokládat, že zjištěné velikosti působících sil v blízkosti dovření mohly být ovlivněny kvalitou výpočetní sítě, a tím pádem i uvedené hodnoty výsledné síly v blízkosti dovření.



Obr. 35: Průběh výslednice sil v ose zavírání v době zavírání při simulaci pádu uzávěru



Obr. 36: Průběh výslednice sil v ose zavírání na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru

ZÁVĚR

Nouzové uzávěry jsou nezbytným a velmi důležitým vybavením vodních elektráren. Tyto uzávěry slouží k rychlému zahrazení toku při havarijních stavech a tím k ochraně prvků a vybavení, které se nachází za těmito uzávěry. Funkci nouzového uzávěru na vodní elektrárně Slapy plní tabulový uzávěr s vodícími koly. Zdvih tohoto tabulového uzávěru je řízen hydraulickým válcem a pohyb při jeho spouštění je primárně iniciován vlastní tíhou uzávěru.

V praktické části byly provedeny CFD simulace hrazení toku tabulovým uzávěrem do plného průtoku na modelu vodní elektrárny Slapy. Simulace byly provedeny pro případ hrazení toku při zavírání uzávěru konstantní rychlostí 0,2 m/s a pro případ pádu uzávěru do toku vlivem vlastní tíhy a působících sil vyvolaných proudícími médii. V obou simulacích byla uvažována třecí síla. Simulace byly provedeny pro nejméně příznivý stav zavírání - byla uvažována maximální provozní hladina na VE Slapy, teplota proudících médií 4°C a maximální objemový průtok při plně otevřeném uzávěru 200 m³/s. Z důvodu náročnosti výpočtu byly simulace provedeny na dvourozměrném modelu a pohyb uzávěru byl omezen pouze na translační ve směru či proti směru zavírání. Simulace tak nezachycují možný pohyb uzávěru ve vymezených vřtech vedení kol a jeho natáčení, které může mít za následek nerovnoměrné zatížení vodících kol a povrchu těsnění. Na velikost třecí síly také má vliv čistota pracovního média, tj. různé písky a jiné drobné nečistoty mohou ovlivnit průběh zavírání. Výskyt těchto nečistot je reálné na díle předpokládat. Pro popis pohybu pádu uzávěru byla využita metoda 6DOF a vytvořena uživatelská funkce, která řídí pohyb uzávěru na základě působících sil. Pohyb uzávěru a přesíťování výpočetní domény v průběhu simulace bylo zajištěno metodou *layering* dynamické sítě. Ve výpočtu byl použit dvourovnicový model turbulence *Realizable k-ε* se stěnovou funkcí *Scalable*. Proudění bylo uvažované jako dvoufázové, kde participujícími fázemi byly voda a vzduch. Sledovanými výsledky obou simulací byly závislosti objemového průtoku, průběhy sil vyvolaných proudícími tekutinami, na jejichž základě byla dopočítána výslednice sil působících v ose zavírání na tabulový uzávěr. V případě simulace pádu uzávěru byla také určena doba uzavíracího procesu a byla sledována rychlost a orientace pohybu uzávěru.

Simulace hrazení toku tabulovým uzávěrem konstantní rychlostí 0,2 m/s proběhla do 99,64 % relativního uzavření, kdy se uzávěr nacházel 25,6 mm nad sedlem uzávěru. Doba simulace hrazení odpovídala 35,47 s. Během pohybu uzávěru docházelo k postupnému nárůstu tlaku před a poklesu tlaku za uzávěrem, vlivem poklesu tlaku byl přisáván vzduch v zavzdušňovacím potrubí. Při relativním uzavření 81 % v době simulace 28,6 s došlo k zavzdušnění přivaděče a oblasti za uzávěrem. Zavzdušnění mělo výrazný vliv na průběh sledovaných sil. Objemový průtok byl sledován v šachtě hradidel pod tabulovým uzávěrem. V průběhu simulace průtok klesal s postupným zavíráním z původních hodnot 200 m³/s až na hodnotu 1,83 m³/s. Horizontální a vertikální síly byly počítány jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na uzávěr. Zjištěné hydrodynamické účinky na uzávěr jsou významné hlavně v horizontálním směru. Horizontální síla narůstala s relativním uzavřením toku a v blízkosti dovření dosáhla maxima 12,91 MN. Z horizontální síly byla následně určena třecí síla. Protože se v tomto případě nejednalo o simulaci se změnou orientace pohybu uzávěru, byly hodnoty třecí síly kladné a síla působila po celou dobu simulace proti směru zavírání. Maximální hodnota třecí síly dosáhla 129,1 kN. Trend i orientace vertikální síly se v průběhu simulace měnily. Při pohybu z výchozí polohy v šachtě hradidel až k hranici průtočného kanálu vertikální síla působila proti směru zavírání. Při dalším zavírání, kdy již se uzávěr nacházel v hlavním proudu kapaliny, síla působila ve směru zavírání. V blízkosti dovření uzávěru při 96,1 % relativního uzavření vertikální síla dosáhla minima -1,56 MN. Při dalším zavírání došlo k změně trendu průběhu síly a její velikost prudce rostla až do konce simulace. Výslednice působících sil v ose zavírání na uzávěr působila po celou dobu hrazení ve směru zavírání a klesla až na hodnotu -1,85 MN, které dosáhla při relativním uzavření 96,1 %. Při dalším zavírání se trend průběhu výsledné síly otočil a síla prudce

rostla až do konce simulace, kde dosáhla -0,377 MN. V simulaci nebyla zjištěna změna orientace výslednice sil v ose zavírání, tím pádem při hrazení toku konstantní rychlostí 0,2 m/s nehrozí zastavení ani otevírání uzávěru vlivem působících sil.

Simulace hrazení toku pádem tabulového uzávěru proběhla do 99,42 % relativního uzavření, které odpovídalo otevření uzávěru 41,4 mm. Simulace uzavíracího procesu trvala 1,529 s. Pohyb pádu uzávěru byl iniciován jeho vlastní tíhou. Rychlost pádu uzávěru rostla z nulové počáteční rychlosti až na velikost 16 m/s, které uzávěr dosáhl v blízkosti dovření. Při dalším zavírání došlo ke zpomalování uzávěru až na hodnotu 14,8 m/s vlivem změny orientace výslednice působících sil. Průběhy objemového průtoku a sledovaných sil výrazně závisely na změně rychlosti pádu uzávěru v době hrazení. K největším změnám sledovaných veličin docházelo zejména od doby 1,4 s, která odpovídala 75 % relativního uzavření. V průběhu hrazení docházelo k velmi prudkému nárůstu tlaku před a poklesu tlaku za uzávěrem vlivem velmi krátké doby hrazení. Také vlivem krátké doby hrazení nestihlo dojít k zavzdušnění oblasti za uzávěrem, a tím k vyrovnání vzniklého podtlaku. Objemový průtok klesal z původních 200 m³/s až na hodnotu 31,66 m³/s, která byla zjištěna při relativním uzavření 99,42 %. Protože průtok pro tak malé otevření je poměrně vysoký a kvalita výpočetní sítě při této simulaci v blízkosti dovření nebyla dostačující, je nutné předpokládat, že výsledky v blízkosti dovření mohly být ovlivněny špatnou kvalitou a možnostmi sítě, jak bylo popsáno v podkapitole 4.3. Horizontální a vertikální síly při pádu uzávěru byly počítány jako součet tlakových a viskózních sil od proudících tekutin působících na uzávěr. Zjištěné hydrodynamické účinky na uzávěr byly velmi významné v horizontálním směru. Horizontální síla rostla s relativním uzavřením toku až na hodnoty 800,7 MN. Nejvýraznější nárůst síly nastal v blízkosti dovření uzávěru, kdy došlo k prudkému nárůstu difference tlaku před a za uzávěrem. Tato velká změna tlaku byla způsobena velmi rychlým zahrazením toku. Protože v simulaci nedošlo ke změně orientace pohybu uzávěru, byla třecí síla po celou dobu simulace kladná a působila proti pohybu zavírání. Maximální hodnota třecí síly dosáhla 8 MN. Trend i orientace vertikální síly se v průběhu zavírání měnily. Do 38 % relativního uzavření síla působila proti směru zavírání. Při dalším zavírání došlo ke změně její orientace a síla působila až do 98,4 % relativního uzavření ve směru zavírání. V blízkosti dovření vertikální síla dosáhla minima -3,52 MN, které nastalo při relativním uzavření 96,1 %. Při dalším zavírání došlo k růstu tlaku v oblasti mezi spodním I profilem uzávěru a sedlem, který zapříčinil prudký nárůst vertikální síly. Vertikální síla od 98,4 % relativního uzavření působila proti pádu uzávěru a dosáhla maxima 10,12 MN na konci simulace. Výslednice sil působících na tabulový uzávěr v ose zavírání byla od počátku simulace pádu záporná, tím docházelo k urychlování pádu uzávěru. Nejvýznamnější pokles výsledné síly nastal vlivem vertikální síly mezi 75 % a 95,6 % relativního uzavření, při kterém výsledná síla dosáhla minima -2,62 MN. Při dalším zavírání se trend průběhu výsledné síly změnil a od relativního uzavření 97,8 % síla působila proti směru zavírání. Výslednice sil dosáhla maxima 17,72 MN na konci simulace. V průběhu simulace hrazení pádem uzávěru byla zjištěna změna orientace výslednice působících sil, ovšem nenastalo zastavení nebo otevírání tabulového uzávěru. Uzávěr se v těsné blízkosti dovření dál zavíral vlivem setrvačnosti pohybu a vlivem opačné orientace výslednice sil byl pouze zpomalován. Avšak je nutné upozornit, že simulace proběhla pouze do 99,42 % relativního uzavření, tedy silové působení a pohyb uzávěru nebyly sledovány až do úplného dovření, ale z dosavadních průběhů lze předpokládat, že k zastavení nebo otevírání uzávěru nedojde. Ovšem z důvodu nedostatečné kvality výpočetní sítě mohly být výsledky v těsné blízkosti dovření ovlivněny kvalitou a možnostmi sítě, jak bylo popsáno v podkapitole 4.3.

Data získaná z provedených simulací nebyla ověřena experimentálním měřením. Proto pro ověření výsledků této práce bylo by vhodné provést měření na díle či modelu. Také pro lepší popsání jevů při hrazení toku by bylo vhodné provést simulace i na prostorovém modelu, který by mimo jiné dokázal zachytit vliv změn šířky vtoku. Simulace na prostorovém modelu v této práci nebyly provedeny z důvodu časové náročnosti výpočtu. Také v průběhu simulace kvalita

výpočetní síť v mezní vrstvě přesahovala doporučené hodnoty y^+ . Síť v mezní vrstvě nebyla dále upravována z důvodu omezení počtu elementů výpočetní sítě studentskou licencí Ansys, kdy již nebylo možné síť dál rozumně upravovat při zachování současné kvality elementů sítě. Pro správné podchycení jevů v mezní vrstvě v blízkosti dovření uzávěru je nutné výpočetní síť zjemnit v kritických oblastech. U těchto dynamických úloh také nastává problém velkého gradientu rychlostí a velké velikosti rychlosti proudění přes malý počet buněk výpočetní sítě v blízkosti dovření. Tento problém bohužel nelze zcela odstranit.

V navazující práci by bylo zajímavé ověřit vliv rychlosti zavírání a vliv tvaru spodní hrany uzávěru na velikost působících sil a velikost fluktuací tlaku. Dle [8] na modelu vtoku přivaděče s nouzovým uzávěrem byly při nižších rychlostech zavírání v simulacích dosaženy, a na modelu díla experimentálně ověřeny, nižší velikosti sil působících na uzávěr. Nižší velikosti sil byly zapříčiněny mírnějším růstem difference tlaku v okolí uzávěru. Ovšem s nižšími rychlostmi hrazení roste doba uzavíracího procesu, a tím i narůstá pravděpodobnost poškození turbíny, či jiného prvku vodní elektrárny. Proto optimální rychlost hrazení z hlediska velikosti působících sil musí vycházet z doby přípustné k zahrazení toku. Také dle [8] měl výrazný vliv na fluktuace tlaku při hrazení tvar spodní hrany uzávěru. K nižším fluktuacím tlaku již docházelo na modelech uzávěru se sklonem odtokové hrany větším než 9° a nejpriznivější vliv na vznikající fluktuace jevil uzávěr se sklonem odtokové hrany 30° . Následující studie hrazení toku tabulovým uzávěrem na VE Slapy by se mohly zabývat navržením optimální rychlosti zavírání z hlediska přípustné doby zahrazení toku a velikosti působících sil či navržením optimálního tvaru spodní hrany uzávěru pro snížení fluktuací tlaku v průběhu hrazení toku.

Tato práce vznikla za podpory projektu "Výpočtové simulace pro efektivní nízkoemisní energetiku" reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008392 financovaného z OP VVV, Prioritní osy 1: Posilování kapacit pro kvalitní výzkum.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOBORIL, David. *Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online]. 2016 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [2] SAADAT, Hadi. Hydroelectric power plants: Schematic diagram of a hydroelectric power plant. In: *PSA Publishing LLC* [online]. 2011 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://psapublishing.com/Hydroelectric.pdf>
- [3] TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Vodohospodářská zařízení III: Vzdouvací stavby* [online]. 2013 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/vzdouvaci_stavby.html
- [4] TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Vodohospodářská zařízení III: Využití vodní energie* [online]. 2013 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/vyuziti_energie.html
- [5] SEN, Shreyasi. Top 6 Major Components of Hydro Power Plant. In: *Your Article Library* [online]. [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.yourarticlelibrary.com/water/hydropower-station/top-6-major-components-of-hydro-power-plant/61028>
- [6] TASK COMMITTEE ON CONDITION ASSESSMENT OF WATER CONTROL GATES. *Water Control Gates - Guidelines for Inspection and Evaluation* [online]. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2012 [cit. 2020-11-12]. ISBN 978-0-7844-7684-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00ARQYIA/water-control-gates-guidelines/front-matter>
- [7] ERBISTI, P. *Design of Hydraulic Gates*. Portland: Ringgold: A.A. Balkema Publishers, 2004. ISBN 9058096211.
- [8] SUND, M. a F. MAGNUSSON. *Numerical study on hydraulic vertical lift gate during shutdown process* [online]. Stockholm, 2014 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <http://www.diva=portal.org/smash/get/diva2:1087251/FULLTEXT01.pdf>. Diplomová práce. KTH Royal Institute of Technology School of Engineering Sciences.
- [9] Hydrotechnika. *Ševčík HYDRO s.r.o.* [online]. [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <http://sevcik-hydro.cz/cz/vyrobní-program/hydrotechnika>
- [10] Gates. *STEEL-FAB, INC* [online]. [cit. 2020-11-11]. Dostupné z: <https://www.steelfabinc.com/product-category/gates/>

- [11] PŘÍHODA, Jaromír a Petr LOUDA. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-800-1036-235.
- [12] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008, 153 s.
- [13] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Mechanika kontinua*. Vyd. 4., rev. a upr. Praha: Academia, 2011. Gerstner. ISBN 978-802-0020-390.
- [14] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění* [online]. Praha [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. Vedoucí práce Tomáš Jirout.
- [15] ARCHIV ČEZ. *Tabulový uzávěr na VE Slapy [fotografie]*.
- [16] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent User's Guide* [online]. Release 15.0. Canonsburg, PA 15317: ANSYS Inc., 2013 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>
- [17] *The Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [18] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent UDF Manual* [online]. Release 15.0. Canonsburg, PA 15317: ANSYS, Inc., 2013 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20UDF%20Manual.pdf#page=449&zoom=100,86,534>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SYMBOL	JEDNOTKA	NÁZEV
a_c	-	faktor kolapsu
a_s	-	faktor dělení
F	N	síla, výslednice sil v ose zavírání
F_G	N	gravitační síla
F_H	N	horizontální síla od proudících médií
F_T	N	třecí síla
F_V	N	vertikální síla od proudících médií
f	-	součinitel tření
G_i	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	vektor vnějších zrychlení
g	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
h	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	měrná entalpie
h_{ideal}	m	ideální rozměr výšky buňky
h_{max}	m	maximální povolená výška buňky
h_{min}	m	minimální povolená výška buňky
K_{ij}	m^{-2}	matice viskózního odporu
L	m	charakteristický rozměr
m	kg	hmotnost
n_i	m	rozměr porézní zóny ve směru i
p	Pa	tlak
\bar{p}	Pa	středovaná hodnota tlaku
p'	Pa	okamžitá výchylka hodnoty tlaku
Q	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	objemový průtok
q	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	tok tepla
Re	-	Reynoldsovo číslo
T	K	teplota
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost proudění, rychlost pohybu
\bar{v}	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	střední rychlost proudění, středovaná hodnota rychlosti
v'	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	okamžitá výchylka rychlosti proudění
x	m	vzdálenost, poloha
α_{ij}	m^2	matice propustnosti média
Δp_i	Pa	tlaková ztráta v porézní zóně
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	dynamická viskozita
ν	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
ρ	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	hustota
τ_{ij}	Pa	tenzor třecích napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Schéma přehradové vodní elektrárny (upraveno) [2]	12
Obr. 2: Schéma přiváděcího potrubí vodní elektrárny (upraveno) [5]	14
Obr. 3: Jezová klapka (upraveno) [6]	17
Obr. 4: Bubnové hradidlo (upraveno) [6]	17
Obr. 5: Segmentový uzávěr (upraveno) [6]	18
Obr. 6: Vicedílné přepážkové hradidlo (upraveno) [6]	19
Obr. 7: Plovoucí přepážkové hradidlo a detail přepážky hradidla (upraveno) [6]	19
Obr. 8: Nafukovací pryžové hradidlo (upraveno) [6]	20
Obr. 9: Posuvné hradidlo (upraveno) [6]	21
Obr. 10: Kapotovaná hradidla (upraveno) [6]	22
Obr. 11: Tabulová hradidla (upraveno) [6]	23
Obr. 12: Instalace tabulového uzávěru na VE Slapy [15]	28
Obr. 13: Zjednodušený model vtoku vodní elektrárny Slapy	29
Obr. 14: Dvourozměrný model přiváděče s částí horní nádrže	31
Obr. 15: Detail uložení tabulového uzávěru v dvourozměrném modelu	31
Obr. 16: Síly působící na tabulový uzávěr	32
Obr. 17: Označení vrstev dynamické sítě při metodě layering (upraveno) [16]	33
Obr. 18: Detail dynamické sítě s rozhraním sliding mesh interface	34
Obr. 19: Zkosení elementů výpočetní sítě	34
Obr. 20: Detaily sítě mezní vrstvy při relativním uzavření 99,4 %	36
Obr. 21: Okrajové podmínky na vstupu a výstupu z domény modelu	38
Obr. 22: Stěny domény vzniklé zjednodušením modelu	39
Obr. 23: Průběh objemového průtoku na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s	41
Obr. 24: Průběh horizontální síly na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s	42
Obr. 25: Průběh vertikální síly na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s	43
Obr. 26: Průběh výslednice sil na relativním uzavření při simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání 0,2 m/s	43
Obr. 27: Průběh rychlosti pohybu uzávěru v době zavírání při simulaci pádu uzávěru	44
Obr. 28: Průběh rychlosti pohybu uzávěru na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru ..	45
Obr. 29: Průběh objemového průtoku v době zavírání při simulaci pádu uzávěru	45
Obr. 30: Průběh objemového průtoku na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru	46
Obr. 31: Průběh horizontální síly v době zavírání při simulaci pádu uzávěru	47
Obr. 32: Průběh horizontální síly na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru	47
Obr. 33: Průběh vertikální síly v době zavírání při simulaci pádu uzávěru	48
Obr. 34: Průběh vertikální síly na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru	48
Obr. 35: Průběh výslednice sil v době zavírání při simulaci pádu uzávěru	49
Obr. 36: Průběh výslednice sil na relativním uzavření při simulaci pádu uzávěru	49
Tab. 1: Maximální hodnoty y^+	35
Tab. 2: Fyzikální vlastnosti pracovních médií [17]	37

SEZNAM PŘÍLOH

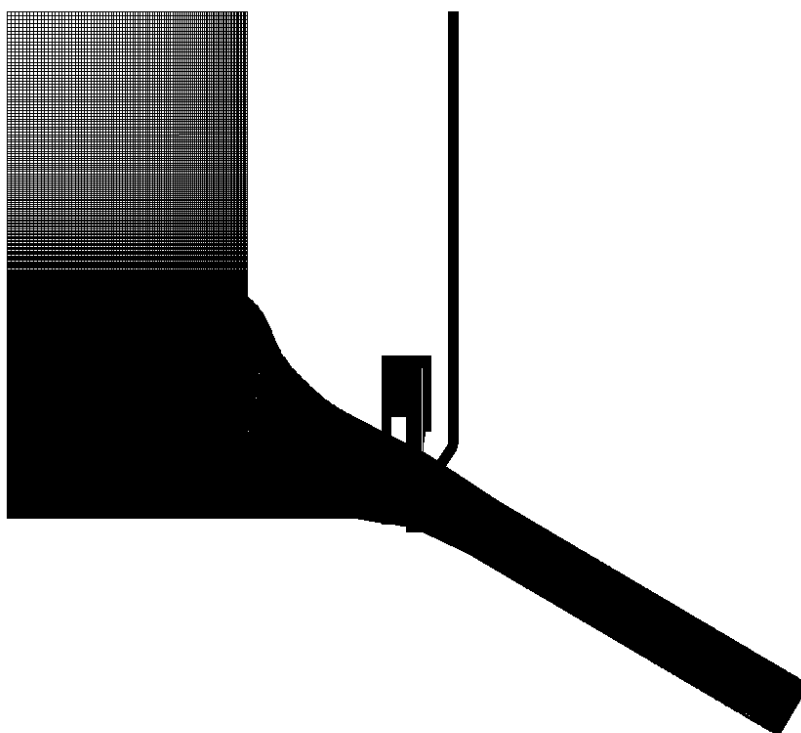
- A VÝPOČETNÍ SÍŤ
- B UDF PÁDU UZÁVĚRU DO TOKU
- C PODROBNÉ NASTAVENÍ ŘEŠIČE
- D HRAZENÍ TOKU KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ
- E HRAZENÍ TOKU PÁDEM UZÁVĚRU

ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY:

SIM_1_faze.mp4	kontury fází v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_1_faze_detail.mp4	detail kontur fází v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_1_rychlost.mp4	vektory rychlosti proudění v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_1_rychlost_detail.mp4	detail vektorů rychlosti proudění v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_1_tlak.mp4	kontury tlaku v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_1_tlak_detail.mp4	detail kontur tlaku v simulaci hrazení toku konstantní rychlostí zavírání
SIM_2_faze.mp4	kontury fáze v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_rychlost.mp4	kontury rychlosti proudění v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_rychlost_detail.mp4	detail kontur rychlosti proudění v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_rychlost_vektor.mp4	vektory rychlosti proudění v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_rychlost_vektor_detail.mp4	detail vektorů rychlosti proudění v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_tlak.mp4	kontury tlaku v simulaci hrazení toku pádem uzávěru
SIM_2_tlak_detail.mp4	detail kontur tlaku v simulaci hrazení toku pádem uzávěru

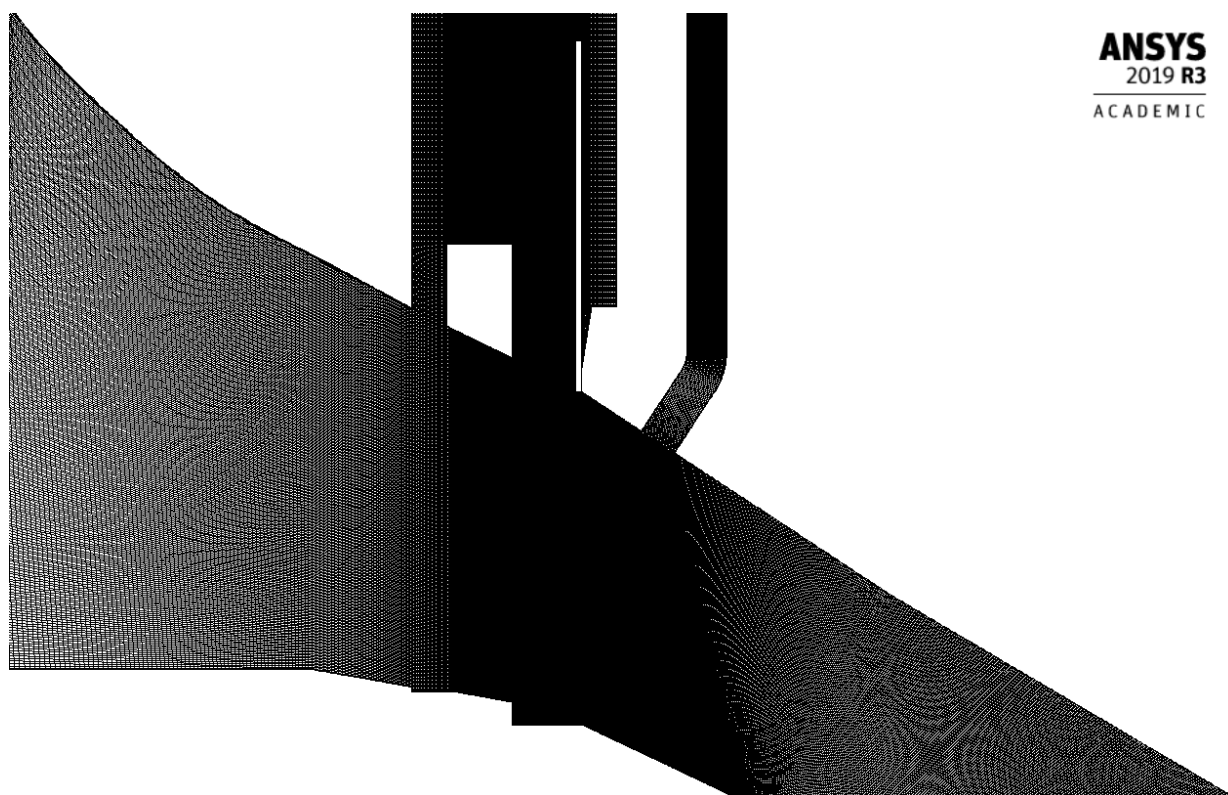
A VÝPOČETNÍ SÍŤ

ANSYS
2019 R3
ACADEMIC

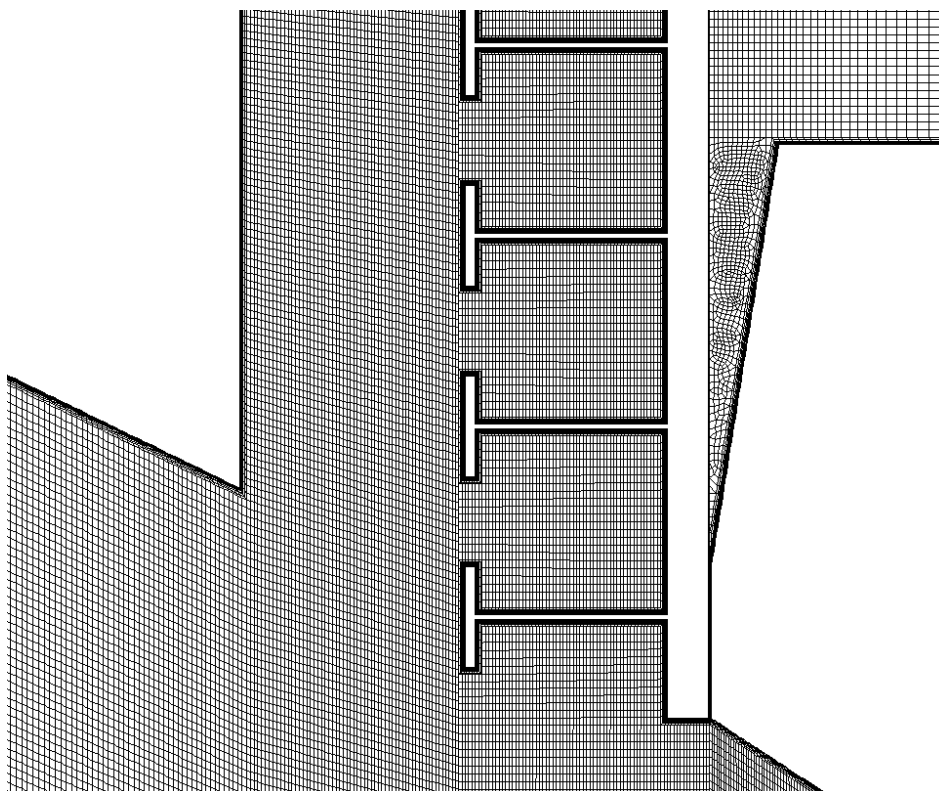


Výpočetní síť – celá doména

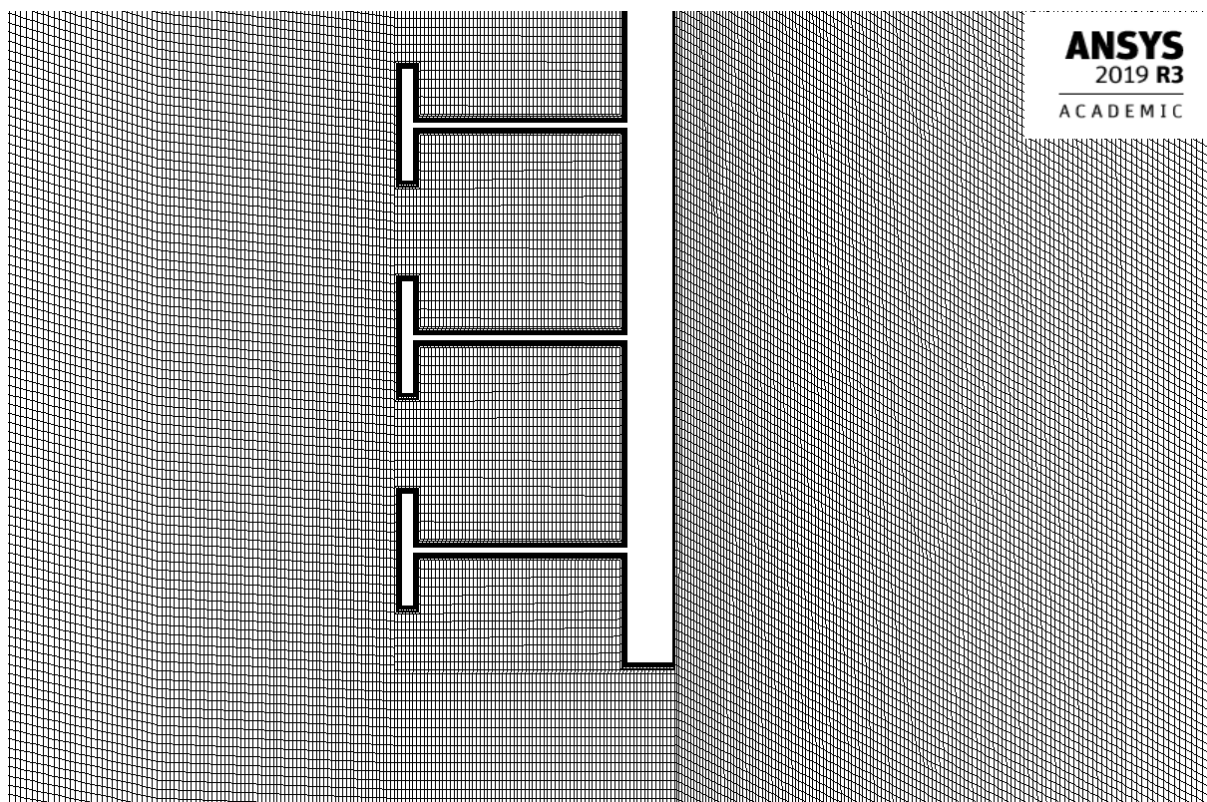
ANSYS
2019 R3
ACADEMIC



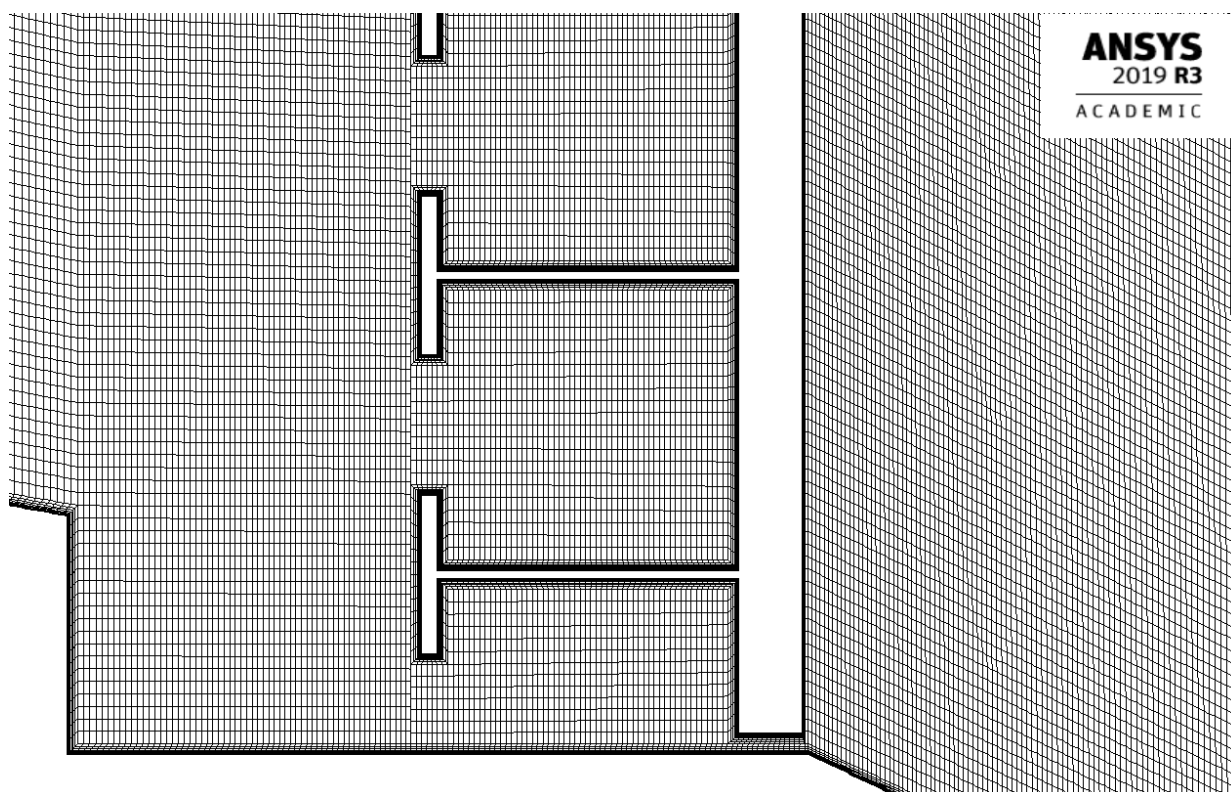
Výpočetní síť – oblast šachty hradidel



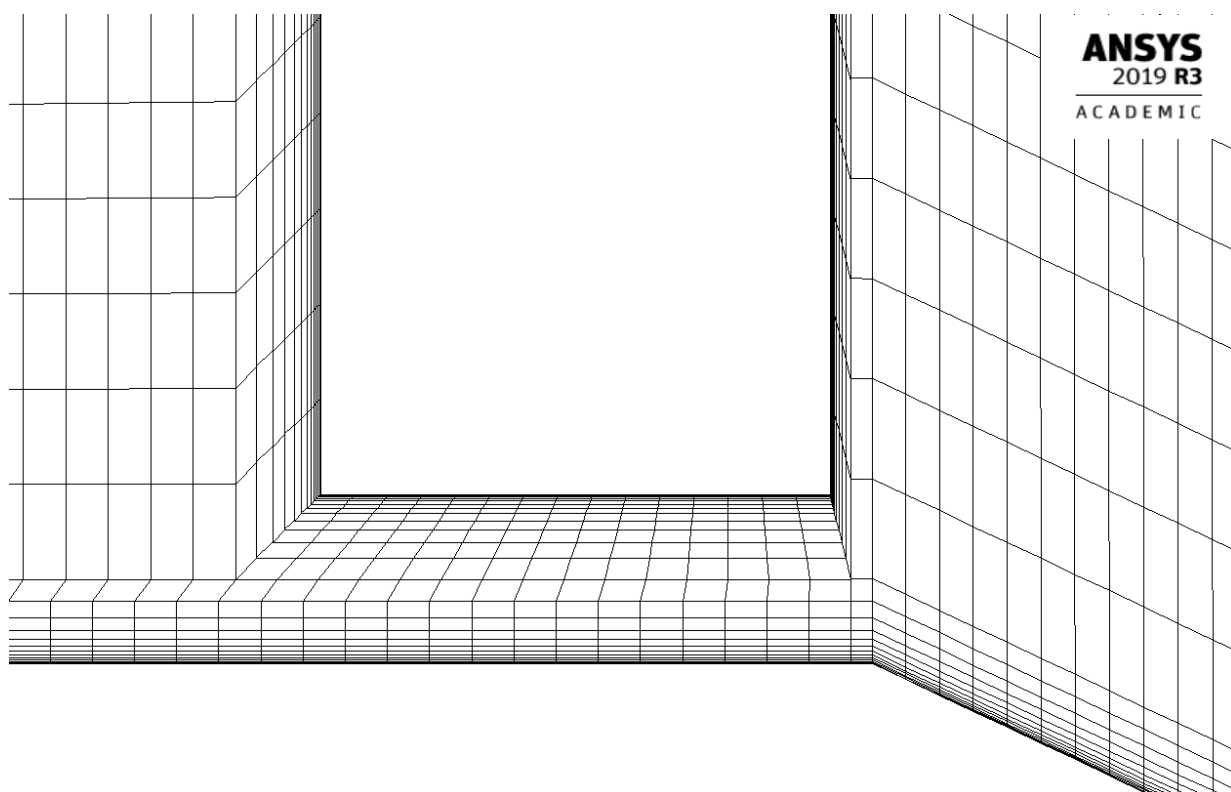
*Výpočetní síť – detail sítě při dosažení průtočného kanálu spodní hranou uzavěru
(relativní uzavření 6,6 %)*



Výpočetní síť – detail sítě okolí uzavěru v průtočném kanálu šachty hradidel



*Výpočetní síť – uzávěr v blízkosti dovření
(relativní uzavření 99,42 %)*



*Výpočetní síť – detail spodní hrany uzávěru v blízkosti dovření
(relativní uzavření 99,42 %)*

B UDF PÁDU UZÁVĚRU

```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "math.h"
#include "dynamesh_tools.h"
#include "storage.h"

DEFINE_SDOF_PROPERTIES(DOF, prop, dt, time, dtime)
{
    FILE* FORCE_BALANCE;
    real Ftreci, Ftotal;
    double NV_VEC(pressure_force);
    double NV_VEC(viscous_force);
    double NV_VEC(force);
    real NV_VEC(yy);
    real NV_VEC(vy);
    real A[ND_ND];
    float MASS = 41080;
    float ft = 0.01;
    float G = 9.81;
    float DEPTH = 4.5;
    yy[1] = DT_CG(dt)[1];
    vy[1] = DT_VEL_CG(dt)[1];
    prop[SDOF_MASS] = MASS;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Y] = FALSE;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Z] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_Y] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_Z] = TRUE;
    Thread* t;
    face_t f;
    t = DT_THREAD(dt);
    pressure_force[0] = 0;
    pressure_force[1] = 0;
    viscous_force[0] = 0;
    viscous_force[1] = 0;
    force[0] = 0;
    force[1] = 0;
    Ftreci = 0;
    Ftotal = 0;
    FORCE_BALANCE = fopen("FORCE_BALANCE.txt", "a");
    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_AREA(A, f, t);
        pressure_force[0] += F_P(f, t) * A[0] * DEPTH;
        pressure_force[1] += F_P(f, t) * A[1] * DEPTH;
        viscous_force[0] += -F_STORAGE_R_N3V(f, t, SV_WALL_SHEAR)[0] * DEPTH;
        viscous_force[1] += -F_STORAGE_R_N3V(f, t, SV_WALL_SHEAR)[1] * DEPTH;
    }
    end_f_loop(f, t)
    force[0] = pressure_force[0] + viscous_force[0];
    force[1] = pressure_force[1] + viscous_force[1];
    Ftreci = -SIGN(vy[1]) * ft * force[0];
    Ftotal = -MASS * G + force[1] + Ftreci;
    prop[SDOF_LOAD_F_Y] = force[1] + Ftreci;
    fprintf(FORCE_BALANCE, "%g %g %g %g %g %g %g\n", time, force[0], force[1], Ftreci, Ftotal, yy[1], vy[1]);
    fclose(FORCE_BALANCE);
}
```

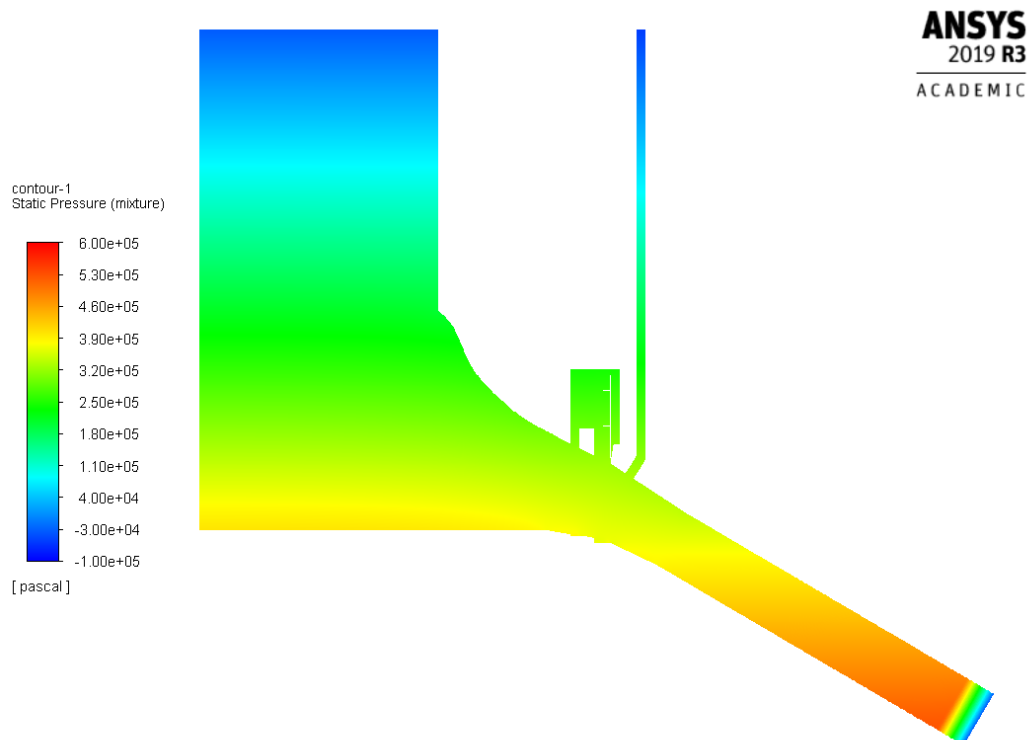
C PODROBNÉ NASTAVENÍ ŘEŠIČE

Nastavení řešiče při stacionárním výpočtu	
Obecné nastavení	Steady, Pressure-based, gravitace
Model turbulence	RANS <i>Realizable k-ε</i> , scalable wall function
Vícefázové proudění	Volume of Fluid, implicit Fáze: voda a vzduch volume fraction cutoff 1e-06, sharp interface implicit body force formulation
Okrajové podmínky	Voda inlet: $p = 0$ Pa Vzduch inlet: $v = 0$ m/s Voda, vzduch outlet: $p = 0$ Pa Porézní zóna
Referenční hodnoty	Šířka modelu: 4,5 m
Podrelaxační faktory	Pressure: 0.5 Momentum: 0.5 Density: 1 Body Forces: 1 Volume fraction: 0.5 k : 0.75 ε : 0.75 u_T : 1
Metody řešiče	COUPLED Pressure: PRESTO! Momentum: QUICK Volume fraction: Compressive k : 2nd order upwind ε : 2nd order upwind
Inicializace	Standartní inicializace $p = 0$ Pa $v_x = 0$ m/s $v_y = -0,5$ m/s $k = 0,007599755$ m ² /s ² $\varepsilon = 0,330965$ m ² /s ³ $VF_{vzduch} = 0$
Výpočet	Time Step Method: automatic Time Scale Factor: 1 Lenght Scale Method: conservative Verbosity: 0

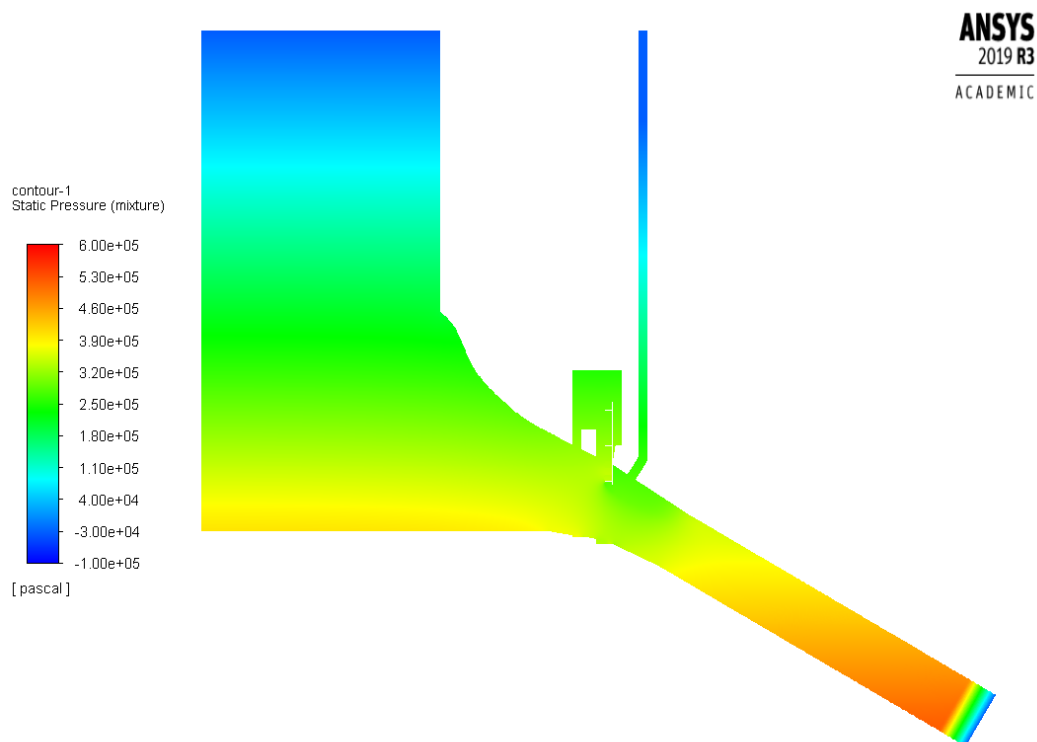
Nastavení řešiče při transientním výpočtu	
Obecné nastavení	Transient, Pressure-based, gravitace
Model turbulence	RANS <i>Realizable k-ε</i> , scalable wall function
Vícefázové proudění	Volume of Fluid, implicit Fáze: voda a vzduch volume fraction cutoff 1e-06, sharp interface implicit body force formulation
Okrajové podmínky	Voda inlet: p = 0 Pa Vzduch inlet: p = 0 Pa Voda, vzduch outlet: p = 0 Pa Porézní zóna
Referenční hodnoty	Šířka modelu: 4,5 m
Dynamická síť	Layering, Sliding mesh interface
Pohyb uzávěru při řízeném zavírání	Konstantní rychlost 0,2 m/s
Pohyb uzávěru při pádu uzávěru do toku	Metoda 6DOF dle UDF
Podrelaxační faktory	Pressure: 0.5 Momentum: 0.5 Density: 1 Body Forces: 1 Volume fraction: 0.5 <i>k</i> : 0.75 <i>ε</i> : 0.75 <i>u_T</i> : 1
Metody řešiče	COUPLED Pressure: PRESTO! Momentum: QUICK Volume fraction: Compressive <i>k</i> : 2nd order upwind <i>ε</i> : 2nd order upwind
Inicializace	Ze stacionárního výpočtu
Výpočet s konstantní rychlostí pohybu	Max Iterations/Time Step: 20 Time step: 1e-03 s až 5e-04 s
Výpočet pádu uzávěru do toku	Max Iterations/Time Step: 20 Time step: 2e-04 s až 5e-05 s

D HRAZENÍ TOKU KONSTANTNÍ RYCHLOSTÍ

Průběh statických tlaků při zavírání konstantní rychlostí

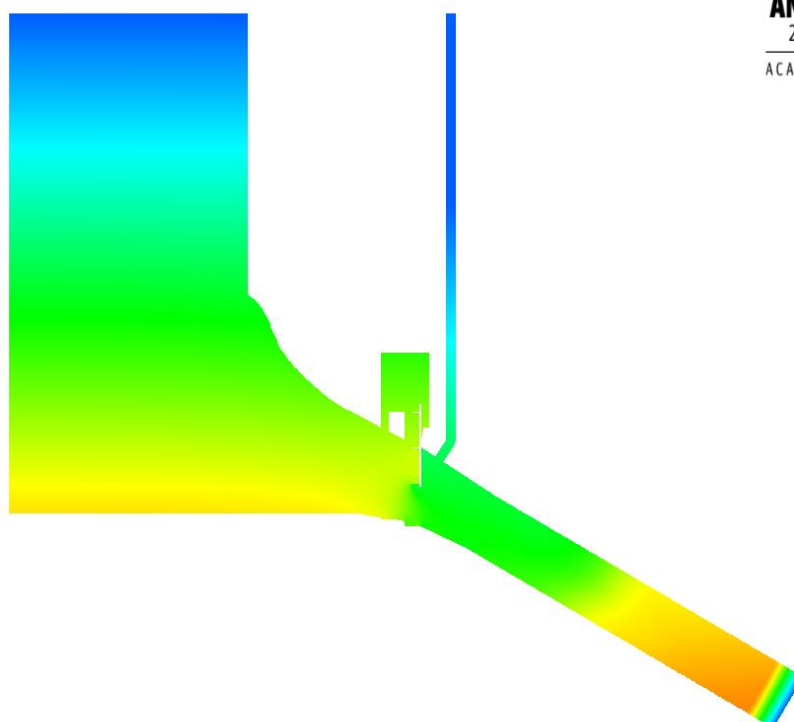
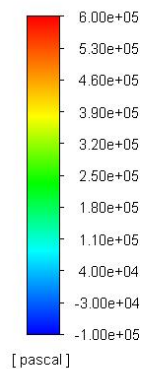


Statický tlak při relativním uzavření 0 %



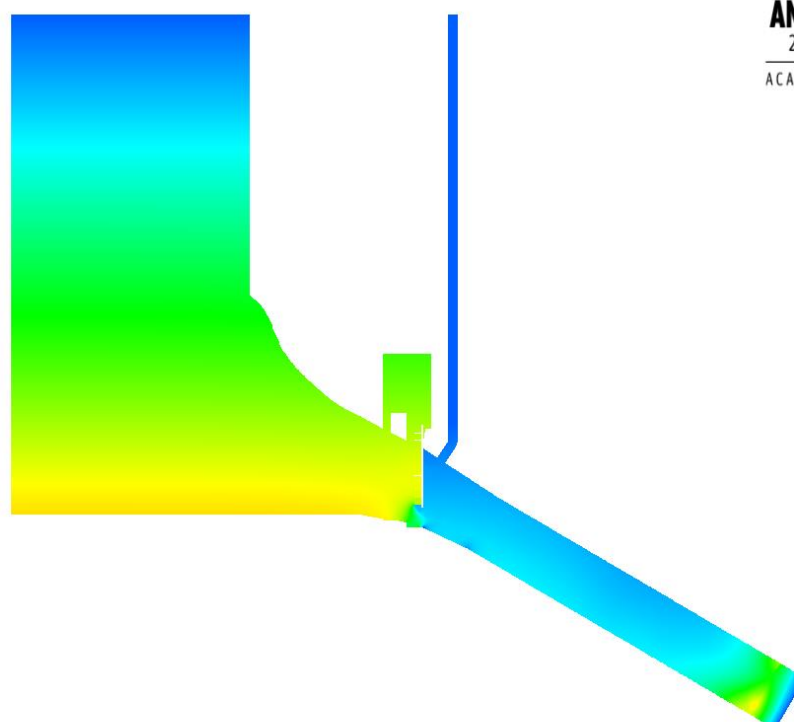
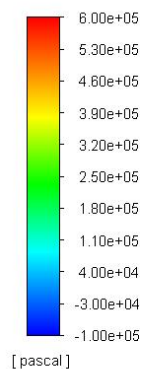
Statický tlak při relativním uzavření 29,9 %

contour-1
Static Pressure (mixture)



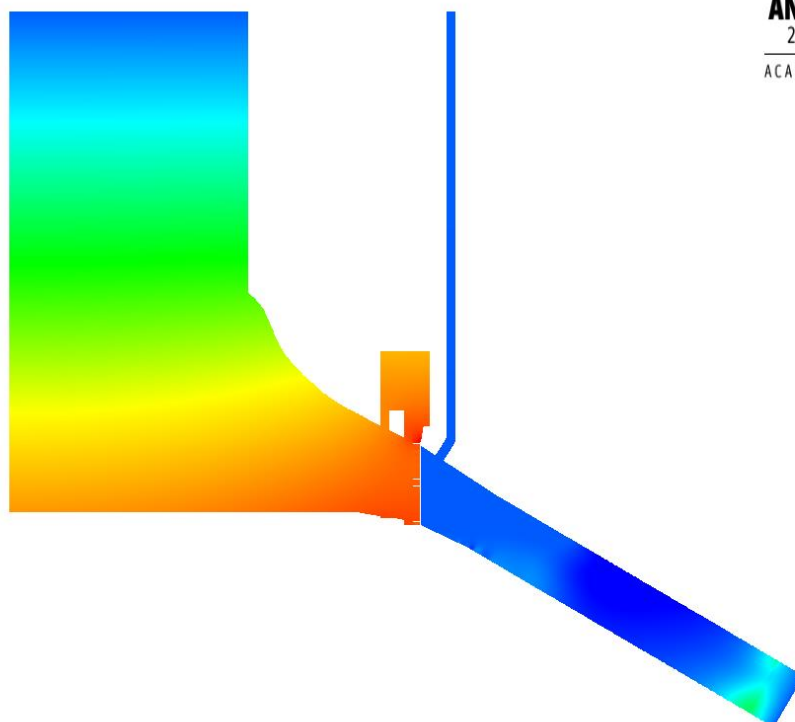
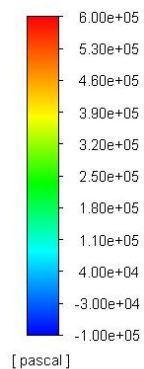
Statický tlak při relativním uzavření 53,3 %

contour-1
Static Pressure (mixture)



Statický tlak při relativním uzavření 76,7 %

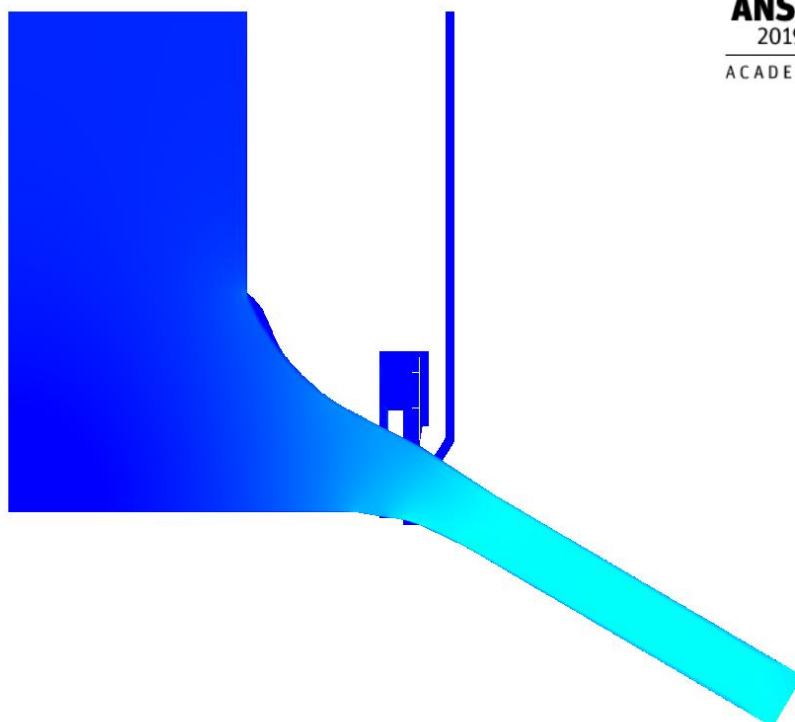
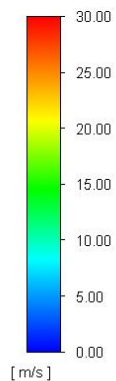
contour-1
Static Pressure (mixture)



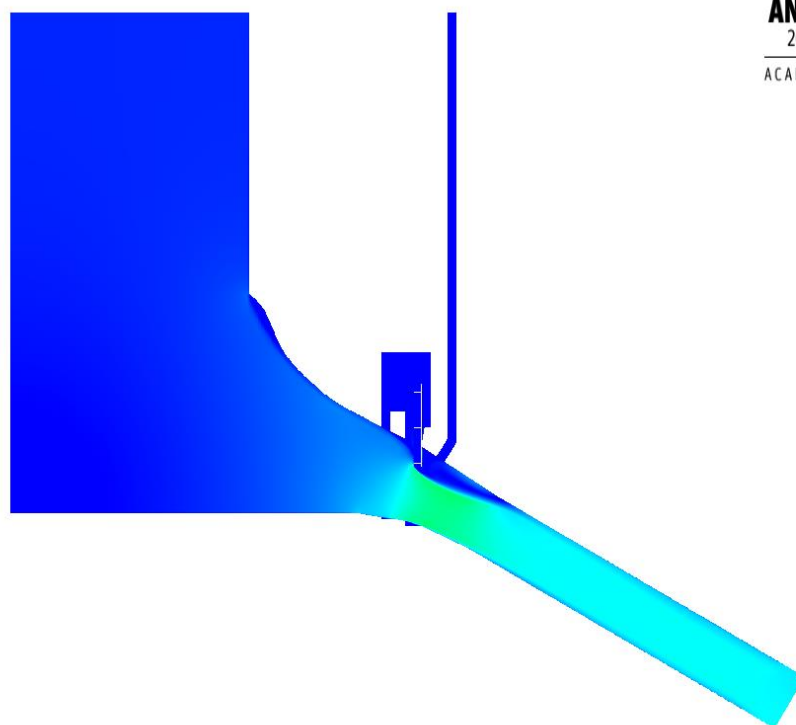
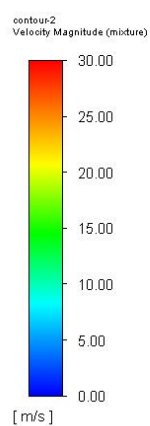
Statický tlak při relativním uzavření 99,64 %

Průběh rychlosti proudění při zavírání konstantní rychlostí

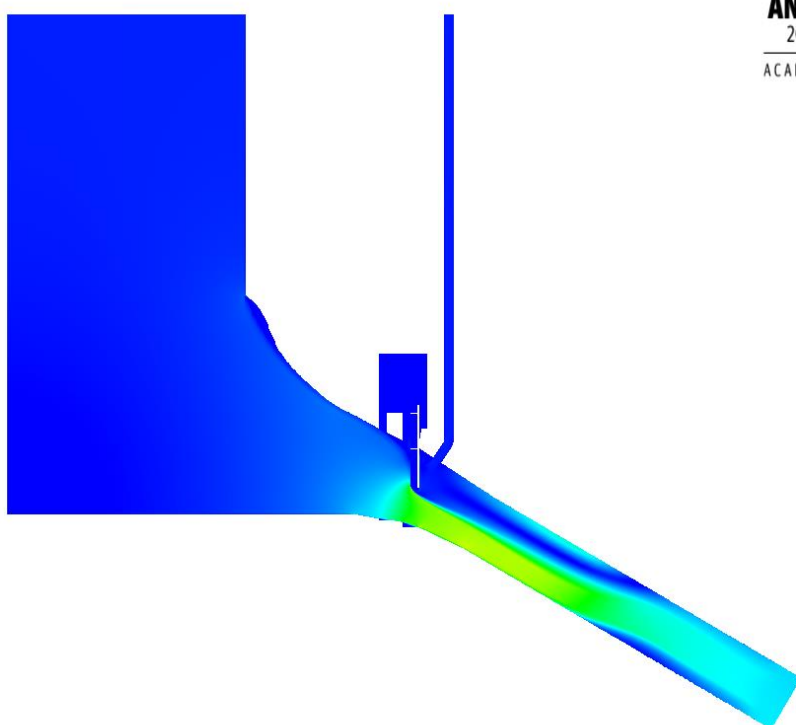
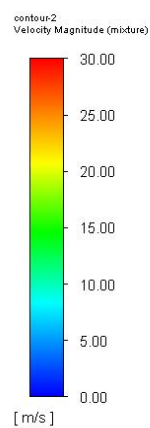
contour-2
Velocity Magnitude (mixture)



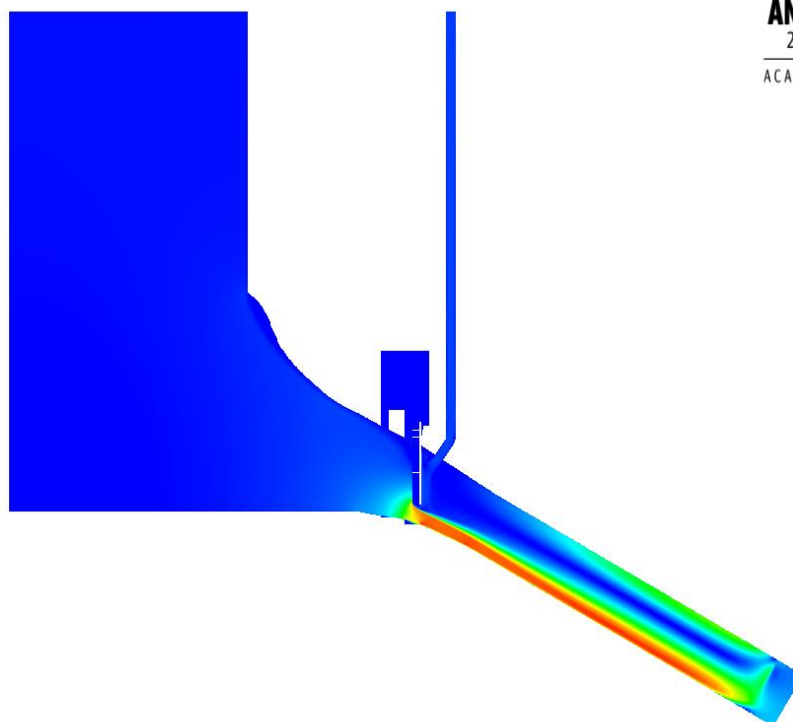
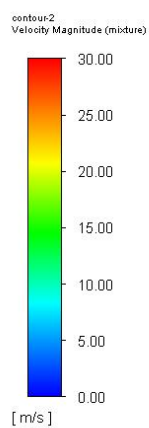
Rychlost proudění při relativním uzavření 0 %



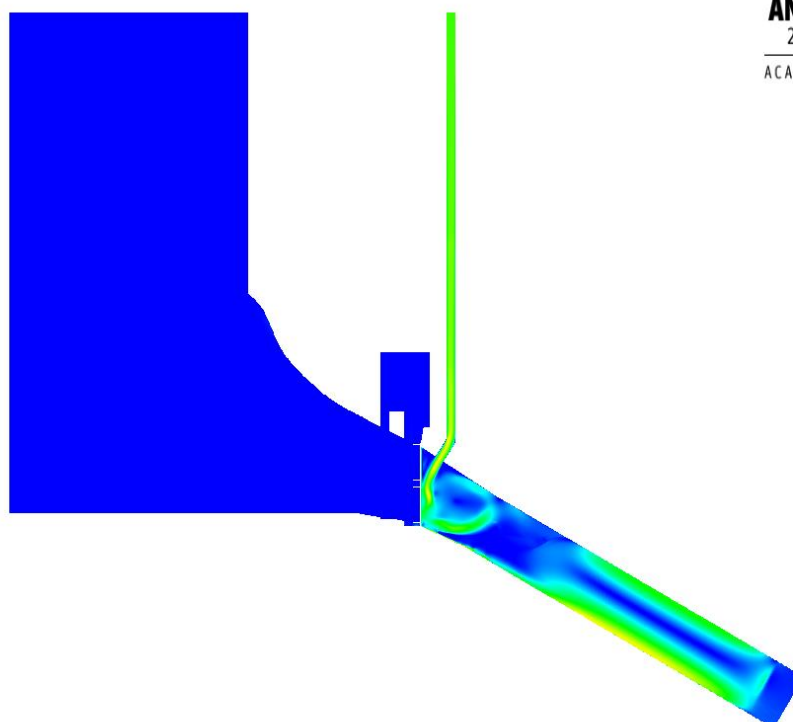
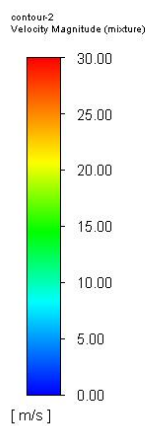
Rychlost proudění při relativním uzavření 29,9 %



Rychlost proudění při relativním uzavření 53,3 %



Rychlost proudění při relativním uzavření 76,7 %

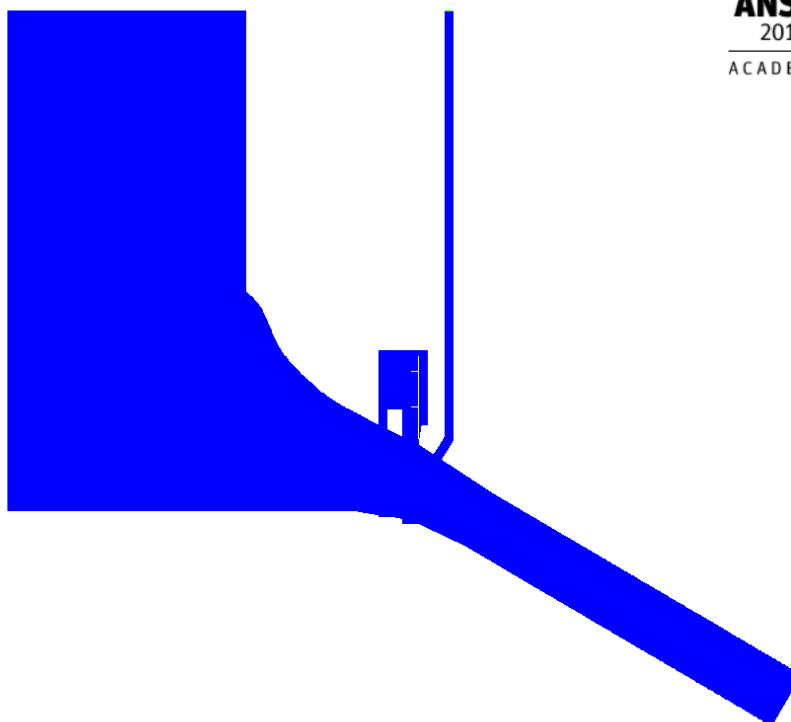
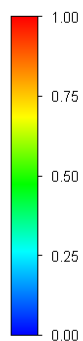


Rychlost proudění při relativním uzavření 99,64 %

Průběh fází při zavírání konstantní rychlostí

ANSYS
2019 R3
ACADEMIC

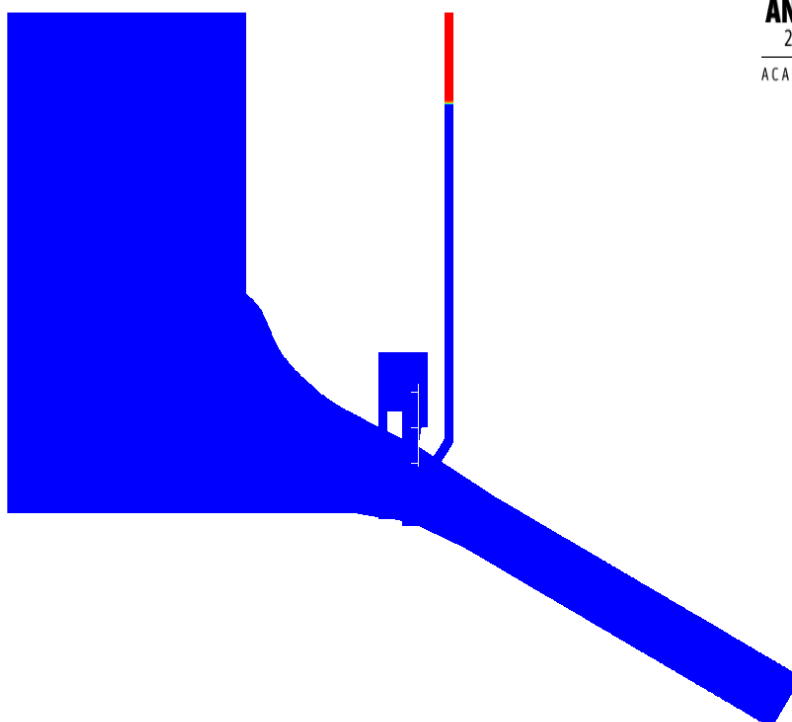
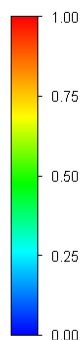
contour-3
Volume fraction (air)



Rozložení fází při relativním uzavření 0 %

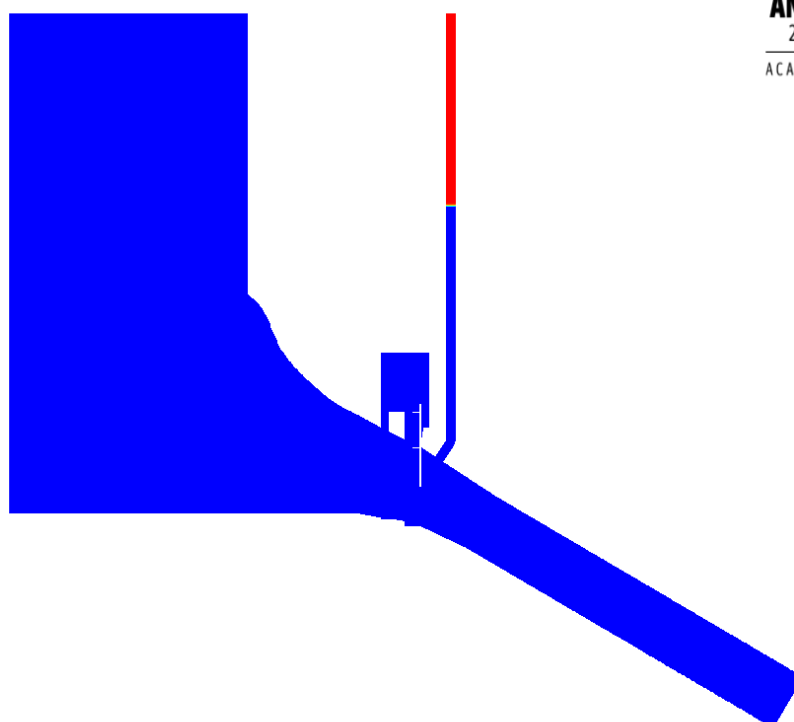
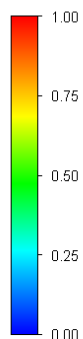
ANSYS
2019 R3
ACADEMIC

contour-3
Volume fraction (air)



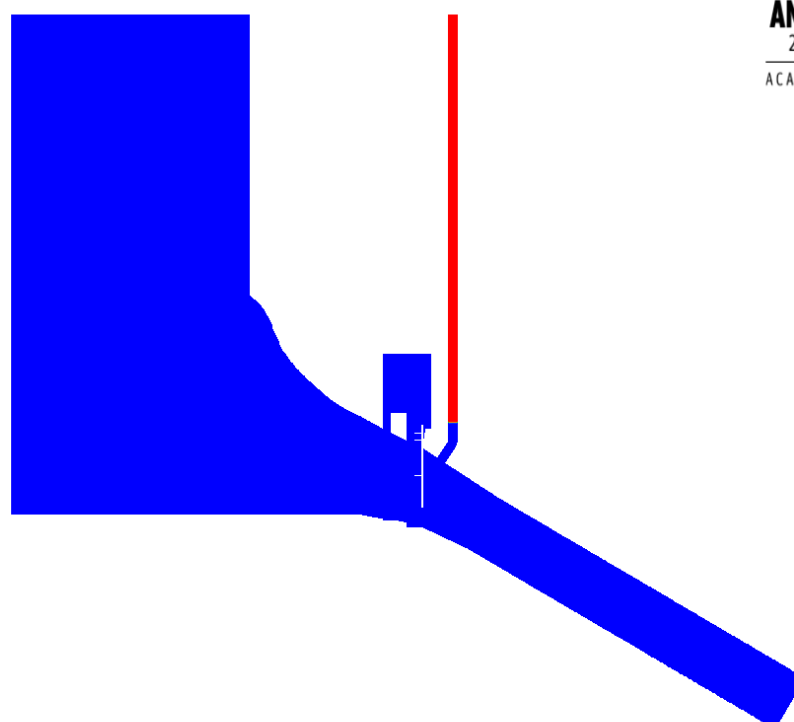
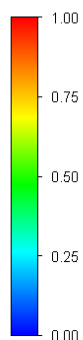
Rozložení fází při relativním uzavření 29,9 %

contour-3
Volume fraction (air)



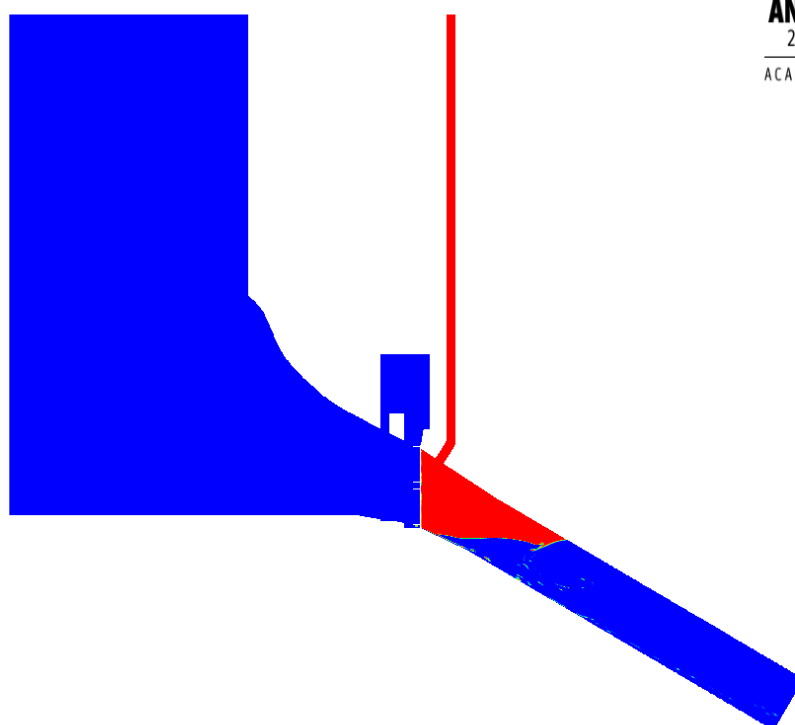
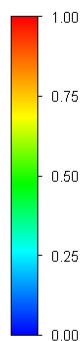
Rozložení fází při relativním uzavření 53,3 %

contour-3
Volume fraction (air)



Rozložení fází při relativním uzavření 76,7 %

contour-3
Volume fraction (air)

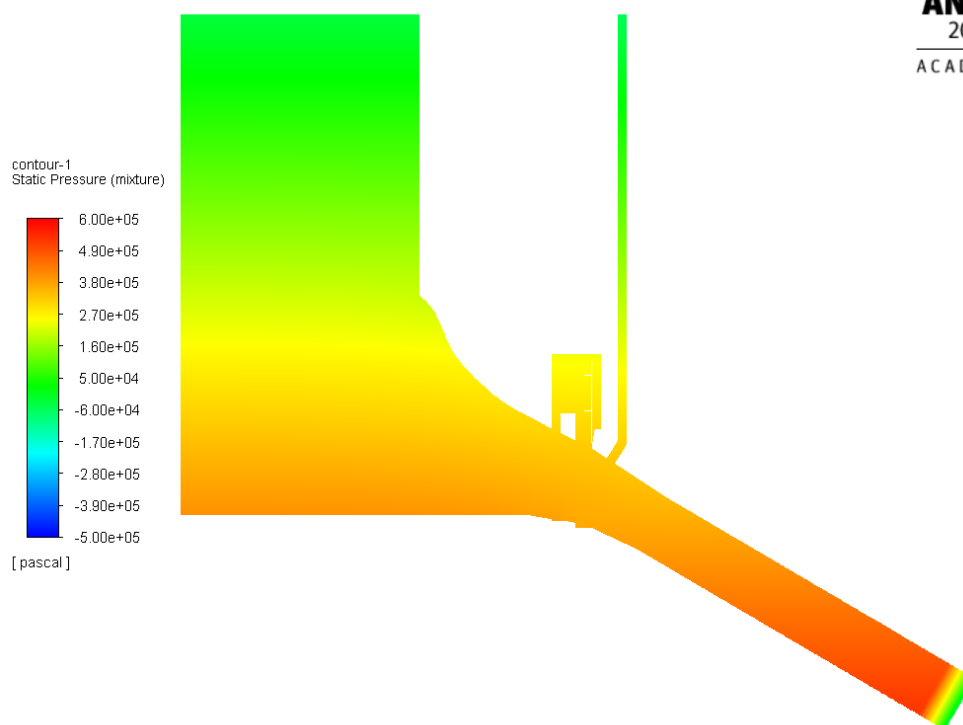


Rozložení fázi při relativním uzavření 99,64 %

E HRAZENÍ TOKU PÁDEM UZÁVĚRU

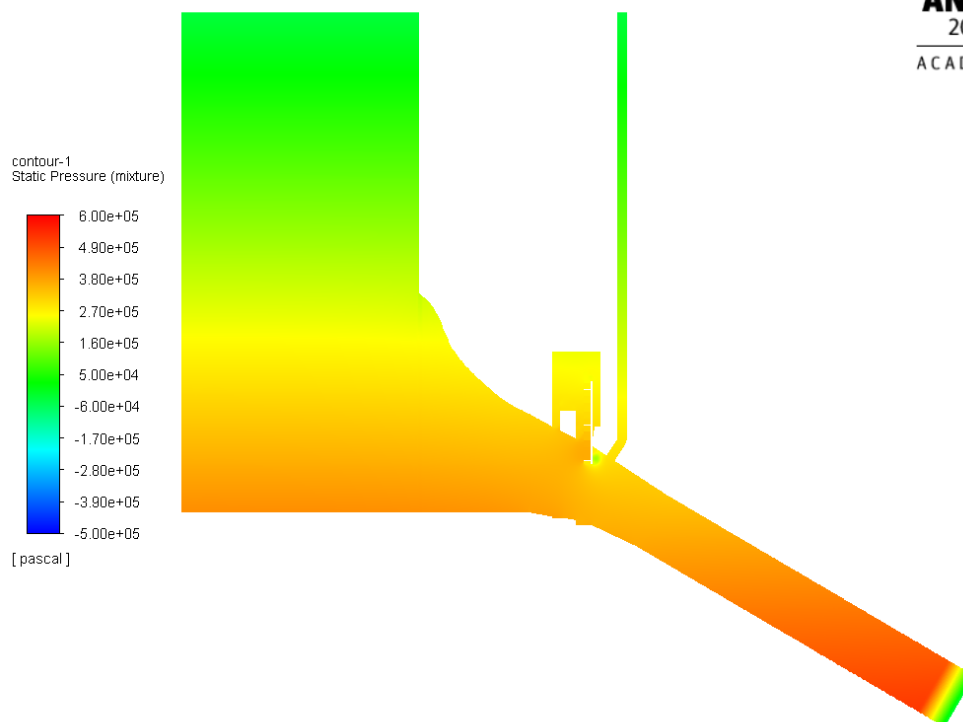
Průběh statických tlaků při pádu uzavěru

ANSYS
2019 R3
ACADEMIC



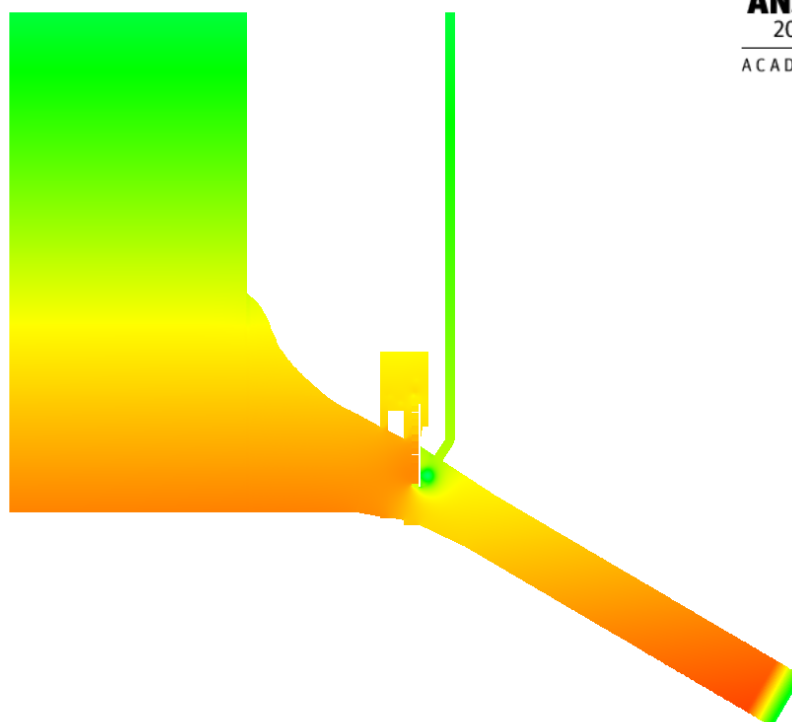
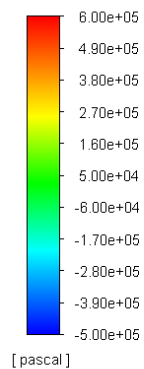
Statický tlak při relativním uzavření 0 %

ANSYS
2019 R3
ACADEMIC



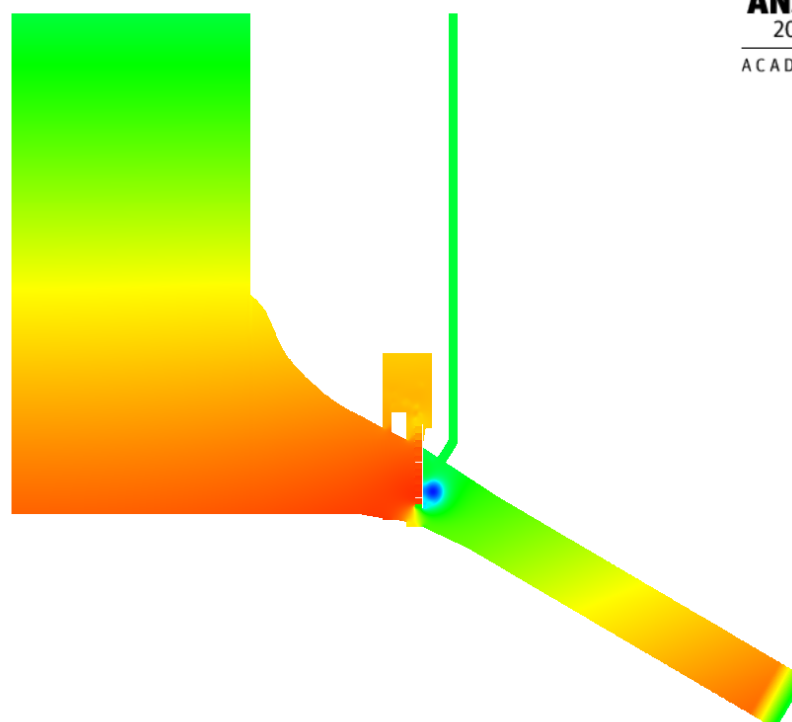
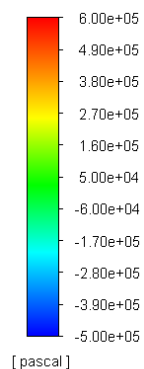
Statický tlak při relativním uzavření 27,7 %

contour-1
Static Pressure (mixture)

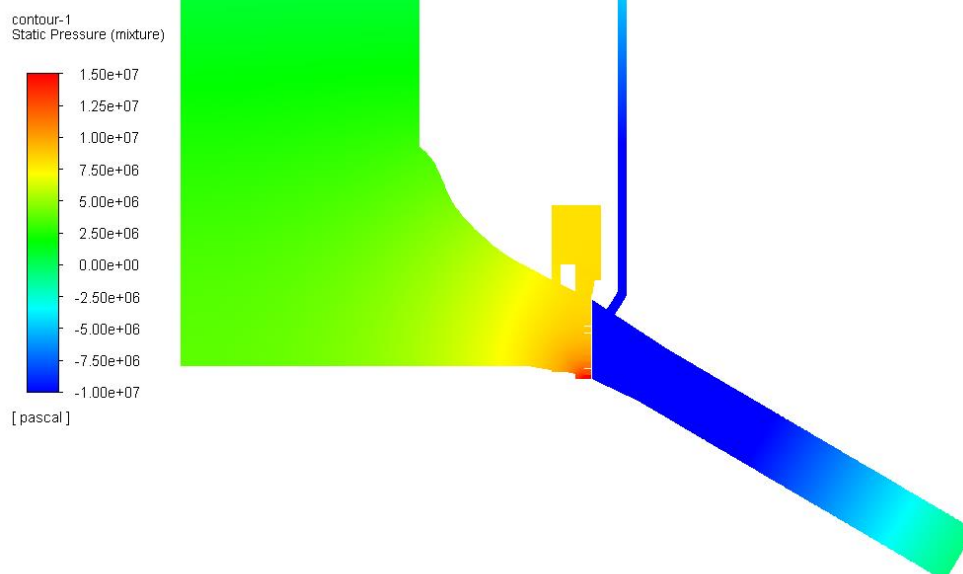


Statický tlak při relativním uzavření 54,5 %

contour-1
Static Pressure (mixture)

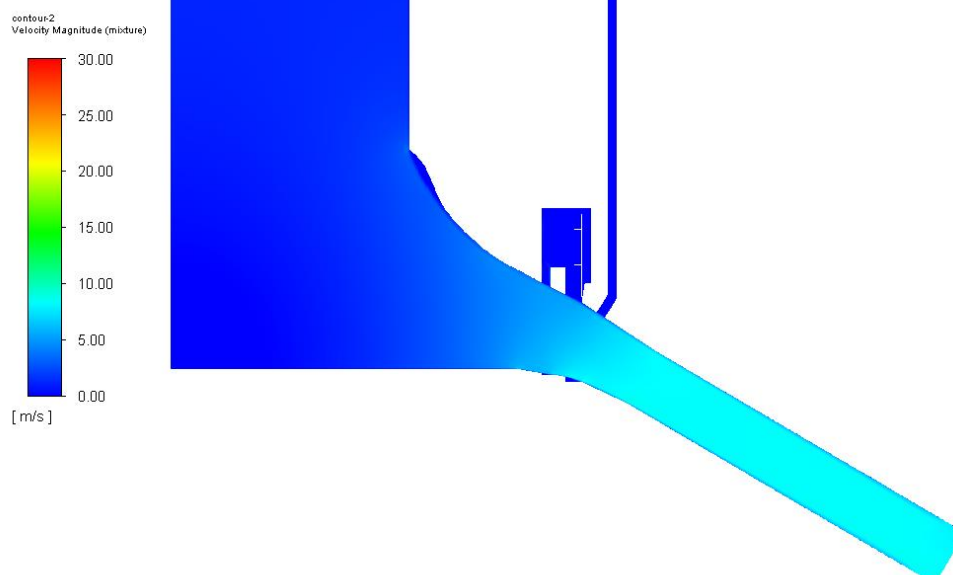


Statický tlak při relativním uzavření 83,8 %

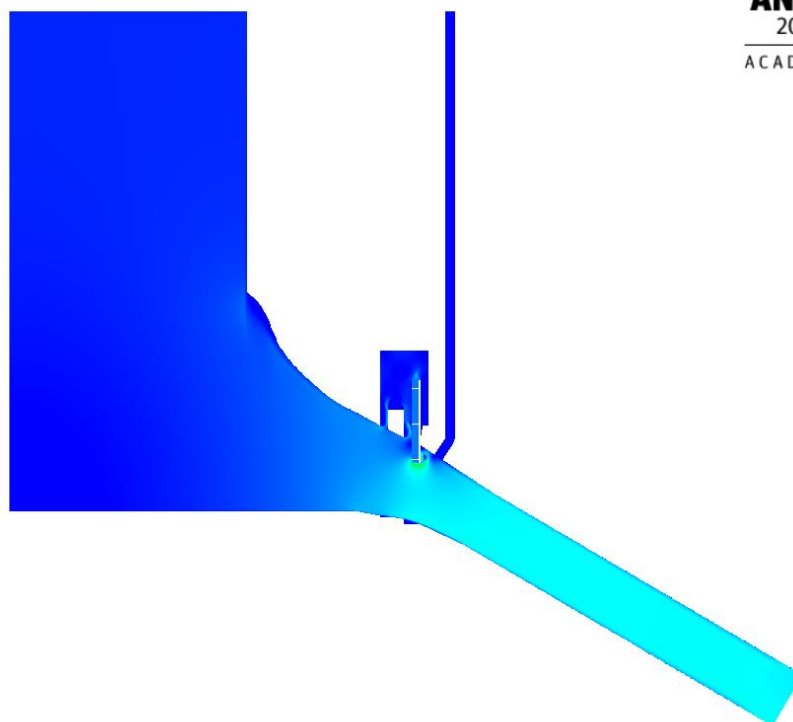
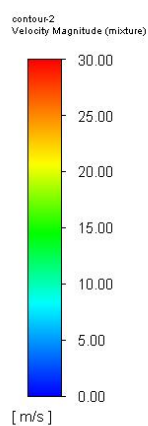


Statický tlak při relativním uzavření 99,42 %

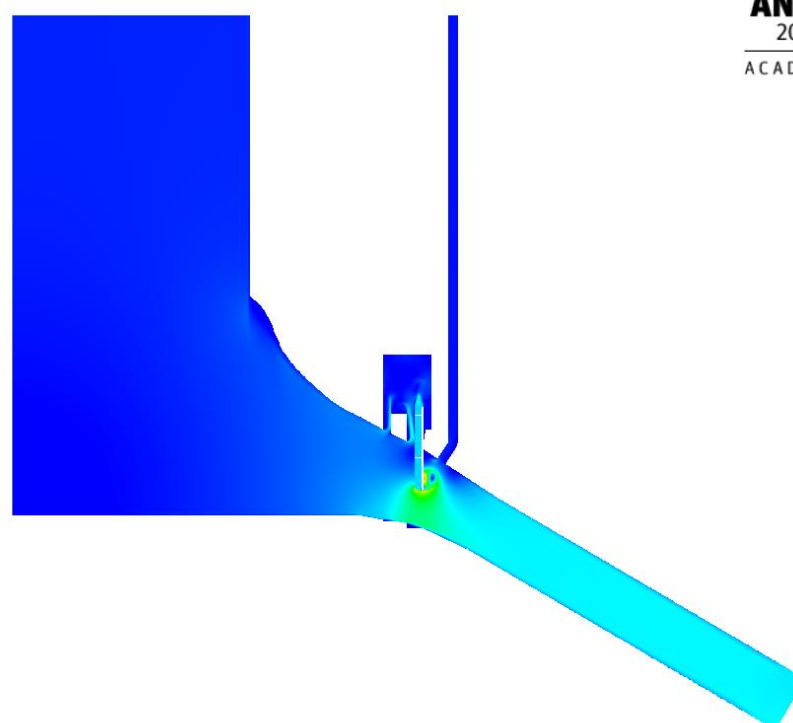
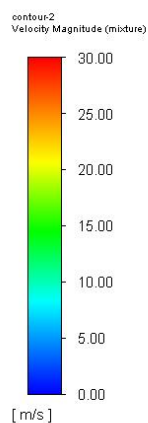
Průběh rychlosti proudění při pádu uzávěru



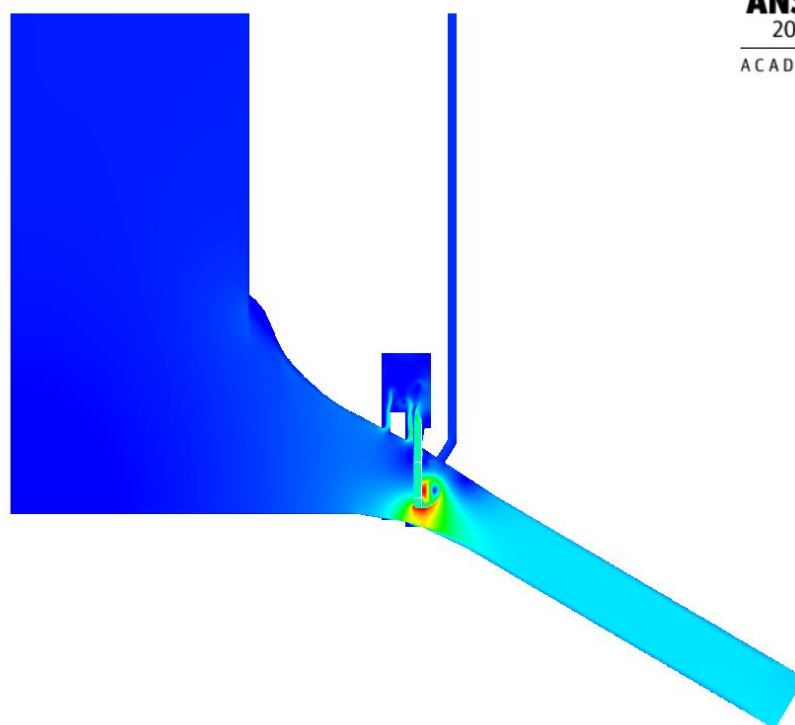
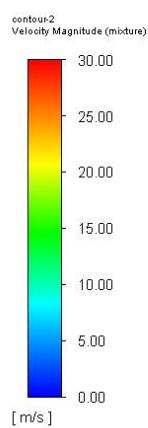
Rychlost proudění při relativním uzavření 0 %



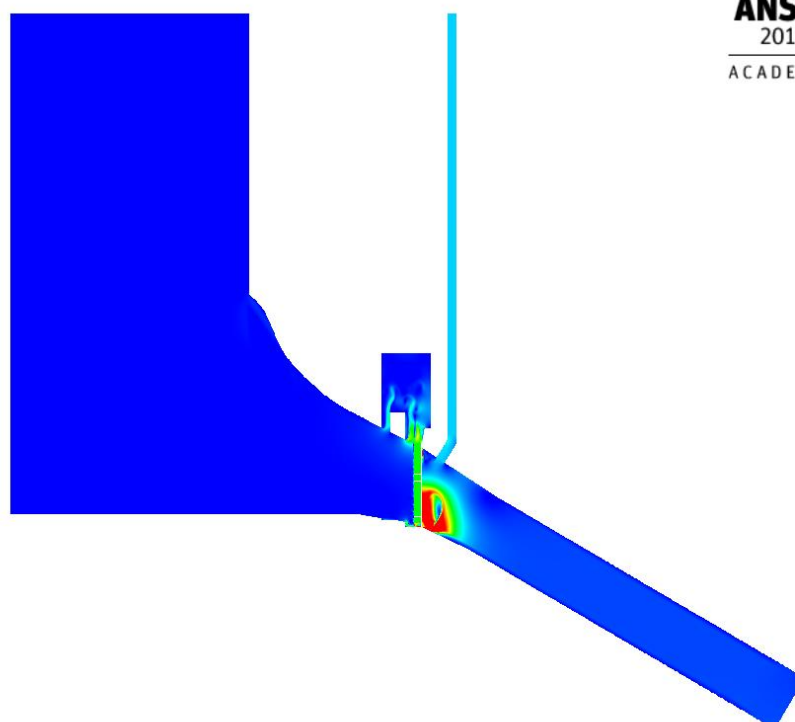
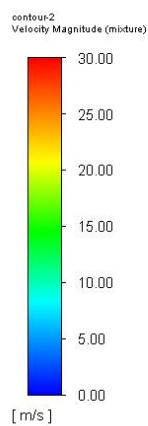
Rychlost proudění při relativním uzavření 27,7 %



Rychlost proudění při relativním uzavření 54,5 %



Rychlost proudění při relativním uzavření 83,8 %

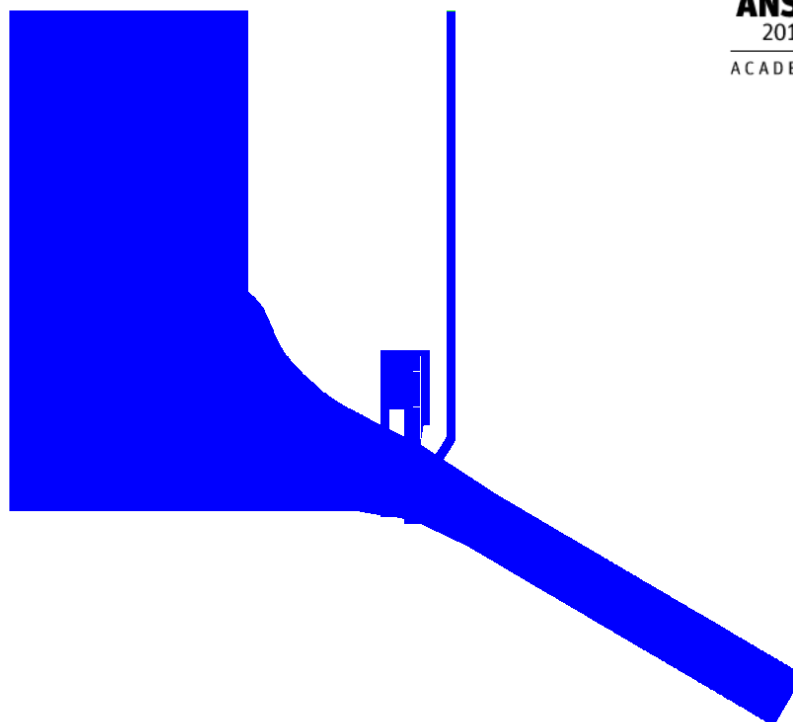
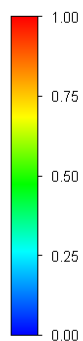


Rychlost proudění při relativním uzavření 99,42 %

Průběh fází při pádu uzavěru

ANSYS
2019 R3
ACADEMIC

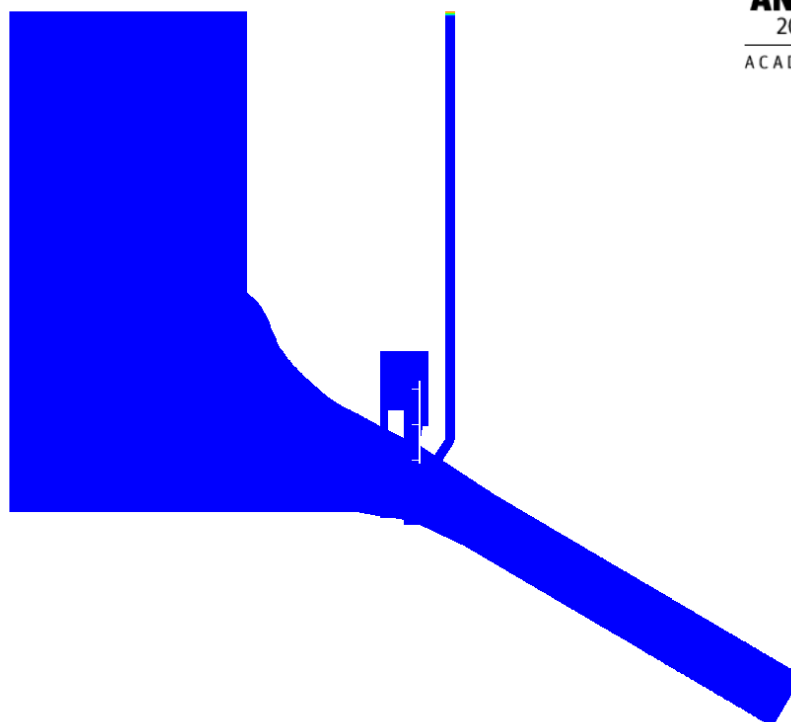
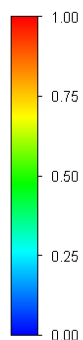
contour-3
Volume fraction (air)



Rozložení fází při relativním uzavření 0 %

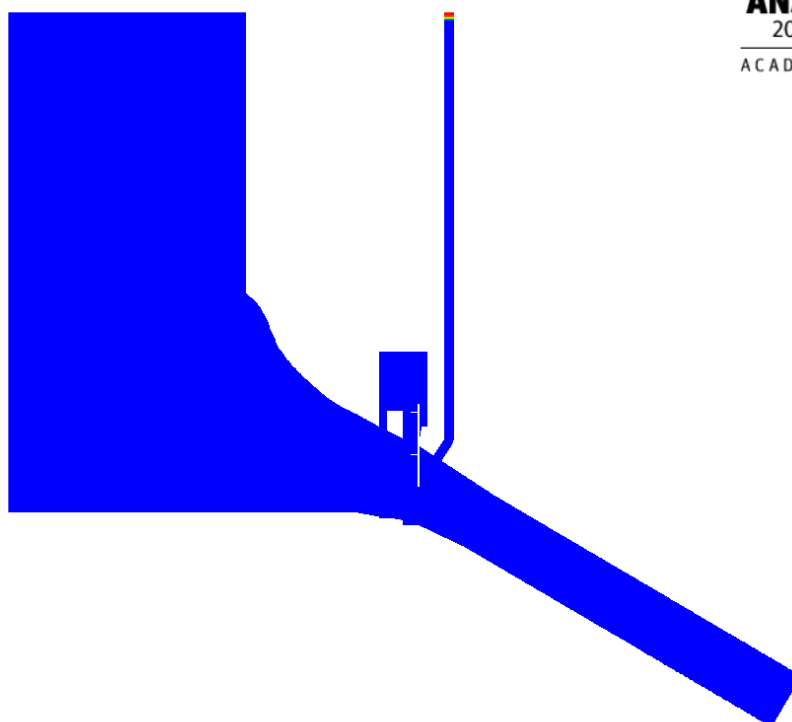
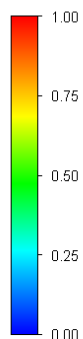
ANSYS
2019 R3
ACADEMIC

contour-3
Volume fraction (air)



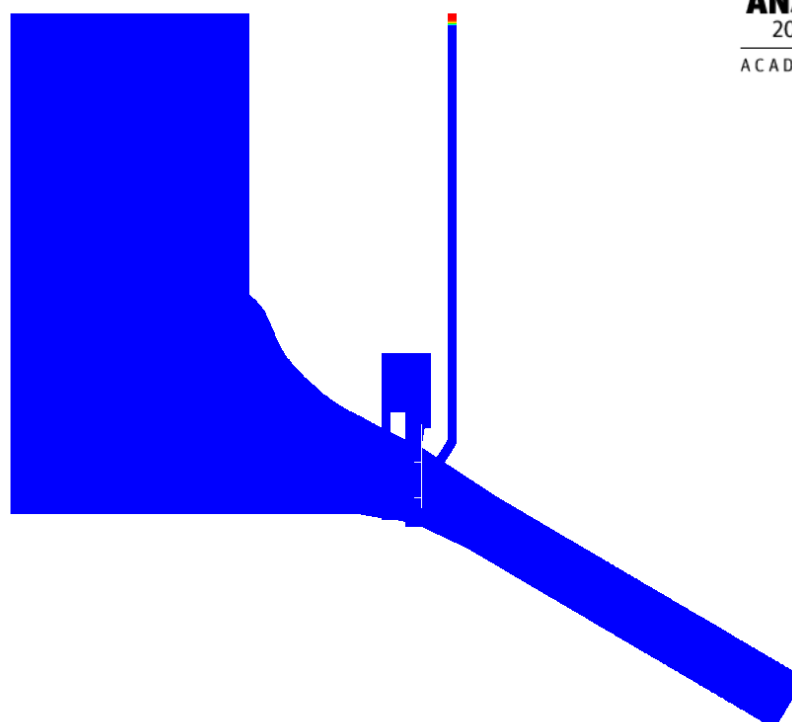
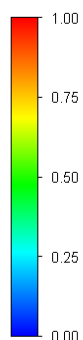
Rozložení fází při relativním uzavření 27,7 %

contour-3
Volume fraction (air)



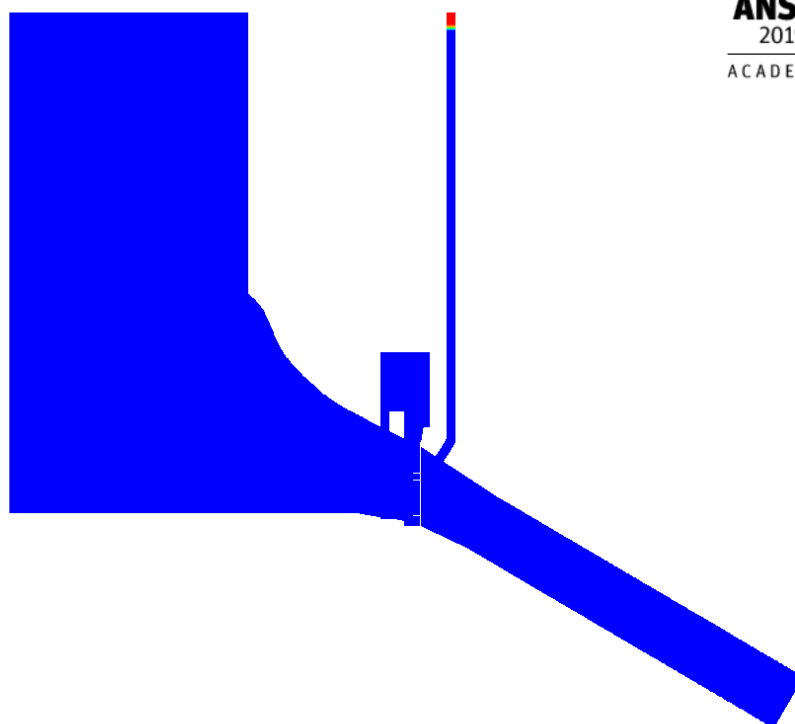
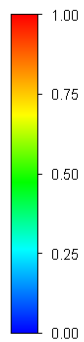
Rozložení fází při relativním uzavření 54,5 %

contour-3
Volume fraction (air)



Rozložení fází při relativním uzavření 83,8 %

contour-3
Volume fraction (air)



Rozložení fázi při relativním uzavření 99,42 %